

Grado en Ingeniería de Sistemas de Comunicaciones
2017-2018

Trabajo Fin de Grado

“IMPLEMENTACIÓN DE O-OFDM MEDIANTE SDR (Específico)”

Gabriel García Sánchez

Tutor/es

Borja Genovés Guzmán

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR · LEGANÉS
21 al 25 de septiembre



[Incluir en el caso del interés de su publicación en el archivo abierto [1]]

Esta obra se encuentra sujeta a la licencia Creative Commons

Reconocimiento – No Comercial – Sin Obra Derivada

RESUMEN

El trabajo de fin de grado que aquí se presenta consiste principalmente en el estudio e implementación de los sistemas de multiplexación por división en frecuencias ortogonales (*orthogonal frequency division multiplexing*, OFDM) en las comunicaciones ópticas mediante la aplicación *National Instrument Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench* (NI LabVIEW).

Se realiza un estudio de distintas modulaciones con la introducción de un Ruido gaussiano aditivo blanco (*Additive white Gaussian noise*, AWGN) observando cómo afecta el ruido a las modulaciones ópticas de OFDM. También se ve la variación de estas modulaciones en función de algunos de los parámetros que los comprenden, como, por ejemplo: el número de subportadoras, potencia transmitida, orden de la constelación, etc. Para el estudio principal nos centramos en comparar los valores de relación señal a ruido con la tasa de error de bit (*bit error rate*, BER).

Gracias a esto se pudo observar que los sistemas con Señal Óptica Asimétrica Recortada OFDM (*Asymmetrically Clipped OFDM*, ACO-OFDM) tenían un mejor rendimiento a relaciones señal a ruido bajas mientras que con Señal Óptica con componente DC OFDM (*Dc-biased Optical OFDM*, DCO-OFDM) dependían de su valor de B_{DC} . También se ve que los sistemas ACO-OFDM pierden eficiencia en espectro. En cuanto al sistema con señal unipolar OFDM (*Unipolar OFDM*, U-OFDM) se observa que tiene un rendimiento intermedio, aunque la tasa de datos se ve decrementada por dos al tener que duplicar el tiempo del símbolo OFDM. Por último, la modulación Señal Óptica Asimétrica Recortada -OFDM (*Asymmetrically Clipped OFDM*, ADO-OFDM) como híbrido de ACO-OFDM y DCO-OFDM aporta distintas alternativas y mejoras de rendimiento entre ambas, ya sea en la relación señal a ruido o en su espectro. Se ha realizado un programa que puede ser utilizado por cualquier usuario. De esa manera, cualquier persona será capaz de configurar los parámetros que desee y evaluar el rendimiento de cada uno de los esquemas de modulación que aquí se presentan.

Para concluir, las comunicaciones de luz visible (*Visible Light Communications*, VLC) se trata de una tecnología con la que se pueden conseguir grandes velocidades, mayor seguridad y usos alternativos a Radiofrecuencia (RF). Como anotación final, decir que se puede profundizar en esta tecnología ya sea en nuevas modulaciones o mejoras de los sistemas que existen.

PALABRAS CLAVE: ACO-OFDM, ADO-OFDM, BER, DCO-OFDM, NI LABVIEW, NI USRP 2920, OWC, U-OFDM, VLC

AGRADECIMIENTOS

Este apartado busca agradecer a todos aquellos que me han apoyado para llegar hasta aquí, a pesar de las dificultades del camino.

Empezando por mis padres que han estado desde el primer momento apoyándome y guiándome.

Luego a los compañeros y profesorado en los que me he apoyado para llegar hasta aquí, consiguiendo un aprendizaje mutuo.

Y quiero concluir agradeciendo al tutor por haberme elegido para este proyecto y por la paciencia y tiempo que me ha dedicado.

INDICE

RESUMEN	2
INDICE DE FIGURAS	7
INDICE DE TABLAS	9
ACRONIMOS Y ABREVIACIONES	10
1. INTRODUCCION	12
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	12
1.2. MOTIVACION	13
1.3. OBJETIVOS.....	13
1.4. METODOLOGIA Y PLANIFICACION	14
1.4.1. METODOLOGIA.....	14
1.4.2. PLANIFICACION	15
1.5. ENTORNO SOCIOECONOMICO	16
2. ESTADO DEL ARTE	17
2.1. MARCO REGULADOR.....	17
2.2. COMPARACION CON LOS SISTEMAS RADIO.....	18
2.3. OWC	19
2.4. AREAS DE APLICACIÓN.....	20
3. DISEÑO DEL SISTEMA.....	21
3.1. NI LABVIEW	21
3.1.1. DESCRIPCION DE LA APLICACIÓN	21
3.1.2. ENTORNO LABVIEW.....	21
3.2. NI USRP-2920	24
3.2.1. DESCRIPCION DEL DISPOSITIVO.....	24
3.2.2. ADAPTACION AL SISTEMA OWC	24
3.3. JUSTIFICACION DE LA SOLUCION	25
4. DESARROLLO	26
4.1. SISTEMA ACO-OFDM	26
4.2. SISTEMA U-OFDM	29
4.3. SISTEMA DCO-OFDM	32
4.4. SISTEMA ADO-OFDM	36
4.4.1. MEJORA DEL SISTEMA ADO-OFDM	40
4.5. DESARROLLO DE LA APLICACIÓN (.EXE).....	41
4.6. IMPLEMENTACION EN HARDWARE	43
5. DIAGRAMA DE GANTT.....	45

6. RESULTADOS	47
6.1. SISTEMAS DCO A DISTINTAS B_{DC}	47
6.2. SISTEMAS ACO-OFDM, DCO-OFDM	47
6.2.1. SISTEMAS CON DISTINTAS SUBPORTADORAS.....	49
6.2.2. DIFERENCIA ENTRE GRAFICA ELECTRICA Y OPTICA	51
6.3. SISTEMA ADO-OFDM CON DISTINTAS CONFIGURACIONES.....	54
6.4. CONCLUSIONES DE LA COMPARACIÓN DE LOS ESQUEMAS	55
7. PRESUPUESTO	56
8. CONCLUSION Y FUTURAS LINEAS DE TRABAJO.....	59
8.1. CONCLUSION	59
8.2. FUTURAS LINEAS DE TRABAJO	59
REFERENCIAS	60
ANEXOS	63
Diagrama de Gantt	63
RESUMEN EN INGLES	64

INDICE DE FIGURAS

Fig. 3.1: Barra controladora de las ejecuciones de NI LabVIEW.....	21
Fig. 3.2: Paleta de funciones de NI LabVIEW.....	22
Fig. 3.3: Esquema de programación en NI LabVIEW.....	22
Fig. 3.4: Bloque de herramientas de NI LabVIEW.....	23
Fig. 3.5: Panel frontal de NI LabVIEW.....	23
Fig. 3.6: Dispositivo NI USRP	24
Fig. 4.1: Esquema de transmisor ACO-OFDM	27
Fig. 4.2: Programación del transmisor ACO-OFDM en LabVIEW.....	27
Fig. 4.3: Programación de Canal + Ruido sistema ACO-OFDM en LabVIEW.....	28
Fig. 4.4: Esquema del sistema ACO-OFDM completo	29
Fig. 4.5: Señal $x[n]$	30
Fig. 4.6: Señal $x[n]$ tras la conversión a U-OFDM.....	30
Fig. 4.7: Esquema de transmisor U-OFDM	30
Fig. 4.8: Programación del transmisor U-OFDM en LabVIEW.....	30
Fig. 4.9: Programación de Canal + Ruido sistema U-OFDM en LabVIEW.....	31
Fig. 4.10: Esquema del sistema U-OFDM completo	32
Fig. 4.11: Señal $x[n]$	33
Fig. 4.12: Señal $x[n]$ tras la suma del B_{DC}	33
Fig. 4.13: Señal $x[n]$	34
Fig. 4.14: Señal $x[n]$ tras la suma del B_{DC}	34
Fig. 4.15: Señal $x[n]$ tras la suma del B_{DC} y el recorte de la parte negativa.....	34
Fig. 4.16: Esquema de transmisor DCO-OFDM	34
Fig. 4.17: Programación de Canal + Ruido sistema DCO-OFDM en LabVIEW...35	35
Fig. 4.18: Esquema del sistema DCO-OFDM completo	36
Fig. 4.19: Esquema de transmisor ADO-OFDM	37
Fig. 4.20: Programación del transmisor ADO-OFDM en LabVIEW.....	38
Fig. 4.21: Programación de Canal + Ruido sistema ADO-OFDM en LabVIEW...39	39
Fig. 4.22: Esquema de receptor ADO-OFDM	40
Fig. 4.23: Esquema de ajuste de potencia ADO-OFDM	41
Fig. 4.24: Captura de pantalla del archivo ejecutable.....	41
Fig. 4.25: Pantalla frontal del ejecutable con todas las modulaciones.....	42
Fig. 4.26: Panel frontal con algunas configuraciones de las modulaciones.....	42
Fig. 5.1: Diagrama de Gantt.....	45
Fig. 5.2: Diagrama de Gantt tareas fechas de inicio y final.....	46
Fig. 6.1: DCO con distintas B_{DC}	47
Fig. 6.2: Diagrama de modulaciones a una tasa y relación señal a ruido.....	49
Fig. 6.3: Sistema ACO-OFDM con $N=16$	49
Fig. 6.4: Sistema ACO-OFDM con $N=64$	49
Fig. 6.5: Sistema ACO-OFDM con $N=256$	50
Fig. 6.6: Sistema DCO-OFDM con $N=16$	50
Fig. 6.7: Sistema DCO-OFDM con $N=64$	50
Fig. 6.8: Sistema DCO-OFDM con $N=256$	50
Fig. 6.9: Sistema U-OFDM con $N=16$	51
Fig. 6.10: Sistema U-OFDM con $N=64$	51
Fig. 6.11: Sistema U-OFDM con $N=256$	51
Fig. 6.12: BER ACO-OFDM óptica	52
Fig. 6.13: BER ACO-OFDM eléctrica	52
Fig. 6.14: BER DCO-OFDM eléctrica	53

Fig. 6.15: BER DCO-OFDM óptica	53
Fig. 6.16: BER ADO-OFDM con distintas configuraciones y $B_{DC} = 3$ dB.....	54
Fig. 6.17: BER ADO-OFDM con distintas configuraciones y $B_{DC} = 7$ dB.....	54

INDICE DE TABLAS

TABLA 4.1. USRP RF DAUGHTERBOARDS.....	43
TABLA 4.2. PARAMETROS DE PDA36A.....	44
TABLA 6.1. POTENCIA ELECTRICA DE LOS SISTEMAS.....	48
TABLA 7.1. HORAS TRABAJADAS.....	56
TABLA 7.2. HORAS TRABAJADAS SIN SOLAPES.....	57
TABLA 7.3. COSTE DE PERSONAL.....	57
TABLA 7.4. COSTE DE MATERIAL.....	58
TABLA 7.5. COSTES TOTALES.....	58

ACRONIMOS Y ABREVIACIONES

ACO-OFDM - *Asymmetrically Clipped OFDM* (Señal Óptica Asimétrica Recortada)
ADO-OFDM - *Asymmetrically Clipped DC biased optical OFDM* (Señal Óptica Asimétrica Recortada con componente DC)
A/D- Conversión analógico a digital
ANSI - *American National Standard Institute* (Instituto Nacional Americano de estandarización)
AWGN- *Additive white Gaussian noise* (Ruido gaussiano aditivo blanco)
BER - *Bit Error Rate* (Tasa de Error de Bit)
DCO-OFDM – *Dc-biased Optical OFDM* (Señal Óptica con componente DC)
D/A- Conversión digital a analógico
E/O- Conversión eléctrico a óptico
IEEE- *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos)
IrdA- *Infrared Data Association* (Asociación de datos infrarrojos)
MAC-*Medium Access control* (Control de acceso medio)
OFDM - *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (Multiplexación por división de frecuencias Ortogonales)
O-OFDM- *Optical OFDM* (OFDM- Óptico)
OWC- *Optical wireless communications* (Comunicaciones ópticas inalámbricas)
O/E- Conversión óptico a eléctrico
P/S- Conversión paralelo a serie
PHY- *Physical layer* (Capa física)
RF- Radio frecuencia
SDR – *Software Defined Radio* (Radio definida por software)
S/P- Conversión serie a paralelo
Li-Fi – *Light Fidelity* (fidelidad de luz)
U-OFDM – *Unipolar OFDM* (señal unipolar)
VLC – *Visible Light Comunicación* (Comunicación de luz visible)
Wi-Fi – *Wireless Fidelity* (fidelidad inalámbrica)

1. INTRODUCCION

Desde los albores de los tiempos se ha buscado maneras de comunicarse. Todo ello ha ido ligado a la distancia y a la complejidad de los datos. Ya desde los romanos se encontraron sistemas de comunicación de manera visual. Por ejemplo, se quemaba en lo alto de las montañas unas almenaras para avisar de un ataque a grandes distancias por medio del fuego. Desde entonces, las maneras de comunicación han seguido avanzando hasta la actualidad y, aunque los sistemas más utilizados, son los sistemas de Radiofrecuencia (RF), también se está volviendo a implementar la comunicación mediante la luz. Como ejemplos se pueden encontrar la fibra óptica, que ahora llega a nuestros hogares, o sistemas de comunicación inalámbricos vía luz, como por ejemplo el infrarrojo de nuestros mandos de televisión o tecnologías como la que buscan aumentar las velocidades y la seguridad de las tecnologías en sistemas de comunicación inalámbrica.

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El avance de la tecnología ligado a la necesidad de interconectar nuestros dispositivos para una mayor comodidad ha llevado a convertir los sistemas de comunicación en una tecnología imprescindible.

Una de las principales razones es que en la actualidad utilizamos la tecnología para todo. Ya sea para comunicarnos, transmitir y almacenar datos, conectar nuestros dispositivos, etc. La búsqueda de una comodidad con la unificación y el control de todas nuestras tecnologías nos lleva a que necesitemos transmitir muchos datos de forma inalámbrica.

La mayor parte de las tecnologías que utilizamos actualmente utiliza la radiofrecuencia, ya que nos permite comunicarnos de manera cómoda y, en ocasiones, alcanzando altas tasas de transmisión. Esto ha permitido que esta tecnología se convierta en un pilar para la sociedad. Hay que decir que últimamente está ocurriendo un problema de saturación del espectro radioeléctrico debido a la gran demanda por parte de los usuarios de comunicaciones inalámbricas. Ello lleva a buscar nuevas alternativas capaces de garantizar esos requerimientos, y las Comunicaciones inalámbricas ópticas (*Optical wireless communications*, OWC) aparece como una nueva tecnología capaz de hacerlo.

Además, esta tecnología permite otras ventajas como:

La seguridad. En zonas como en los quirófanos, donde se están añadiendo nuevos sistemas tecnológicos, esta tecnología evita las interferencias externas e internas ya que la luz no atraviesa las paredes a diferencia de la radiofrecuencia. Dado que muchos dispositivos generan campos electromagnéticos, también evitas interferencias internas permitiendo un uso más seguro de los sistemas de comunicación dentro del recinto.

Aumento de las tasas de transmisión. El esquema de modulación Multiplexación por OFDM típico en RF, ha sido adaptado a OWC dando lugar a diferentes variantes como son ADO-OFDM, DCO-OFDM, U-OFDM, ACO-OFDM.

La modulación OFDM tradicional no puede emplearse en OWC ya que aquí se realiza una modulación de la corriente eléctrica, la cual solo puede tomar valores reales y positivos, con nuevas adaptaciones a este sistema.

Por tanto, el proyecto propuesto se encargará de estudiar y analizar las modulaciones ópticas OFDM (*Optical OFDM*, O-OFDM) en el entorno tecnológico de LabVIEW, permitiendo no sólo ver las ventajas y desventajas de estos esquemas de modulación, sino que se proporciona un programa capaz de ser instalado en cualquier ordenador para que el usuario estudie y valore por sí mismo el uso de cada esquema. Además, desarrollando

el hardware propuesto el usuario podrá hacer una transmisión real de un sistema de comunicaciones de luz visible (*Visible Light Communications*, VLC).

1.2. MOTIVACION

El proyecto propuesto supone una profundización de aspectos estudiados en el grado de Ingeniería en Sistemas de Comunicaciones y la posibilidad de llevarlo a la práctica.

Además, este proyecto me permite realizar un estudio e investigación más independiente acorde a un alumno que ya está acabando la carrera, permitiendo preparar mejor para la vida laboral. También cabe decir que se trata de una tecnología que aún no está muy integrada en la sociedad y me proporcionará una gran ventaja competitiva el conocerla, estudiarla e implementarla. En cambio, dado que desconocía esta tecnología sumado al desarrollo de la misma en un entorno novedoso, me tuve que apoyar en una herramienta que domino como es Matlab para comprobar valores y el funcionamiento de cada bloque. Este proyecto engloba la parte electrónica con la integración del Dispositivo de radio definido por software - *National Instruments (National Instruments - Universal Software Radio Peripheral, NI USRP)*, todo lo relacionado con las comunicaciones digitales y el uso de la aplicación NI LabVIEW, consiguiendo así englobar una gran parte de lo estudiado en el grado de ingeniería en sistemas de telecomunicaciones. Todo este trabajo también viene motivado por el aprendizaje de un nuevo lenguaje de programación como es NI LabVIEW, lo que implicará una ventaja competitiva a la hora de buscar trabajo al tratarse de un lenguaje cada vez más utilizado en empresas. VLC puede aplicarse en muchos entornos, incluido en empresas, dotándolas de un mayor rendimiento en cuanto a tasas de transmisión y seguridad, pudiendo separar cada habitáculo de sus oficinas para potenciar la privacidad. También permite un ahorro energético ya que al iluminar un espacio ya va incluido el funcionamiento Li-Fi.

1.3. OBJETIVOS

El objetivo de la tecnología VLC es dar una alternativa de comunicación a los sistemas RF para aumentar la velocidad y los dispositivos a conectar. El principal objetivo en este Trabajo de Fin de Grado TFG es estudiar las modulaciones de esta tecnología, evaluarla, e implementarlas para un uso futuro mediante la aplicación NI LabVIEW y su hardware apropiado.

Los aspectos en los que se va a centrar este proyecto son:

- El estudio de los distintos esquemas de modulación OFDM para comunicaciones ópticas inalámbricas.
- Desarrollo de estas modulaciones en una plataforma SDR.
- Comparación de los diferentes esquemas O-OFDM.
- Implementación de un programa que sea capaz de ejecutar los diferentes esquemas planteados, con sus características.
- La descripción del desarrollo de un prototipo capaz de transmitir utilizando los diferentes esquemas de modulación propuestos.

1.4. METODOLOGIA Y PLANIFICACION

1.4.1. METODOLOGIA

El apartado se centra en cómo se va a trabajar en este proyecto para conseguir obtener los resultados previstos.

La realización de este proyecto se ha centrado en 5 aspectos fundamentales.

1. El primero de ellos es la recopilación y estudio de documentación tanto de los sistemas OWC como de la aplicación y software LabVIEW.
2. Después el desarrollo de las modulaciones a estudiar.
3. Recopilación de los datos y evaluación de estos.
4. Por último, se concluye con una recopilación de todos los datos obtenidos e indica que se ha aprendido.
5. Paralelo a todo ello se lleva a cabo la redacción de la memoria permitiendo tener los datos más actualizados y permitiendo afianzar los conocimientos que se iban adquiriendo al tener que documentarlos.

Consiguiendo así, la implementación de modulaciones O-OFDM, a través del software NI LabVIEW. El uso de esta aplicación viene dado por su facilidad de uso y la posibilidad de implementación en hardware. Las modulaciones estudiadas en este proyecto han sido presentadas por investigadores de grandes centros en [2], [3].

Todos ellos aportan la información necesaria para poder diseñar los sistemas a estudiar.

Gracias al documento [4], se buscó cómo realizar la implementación de las modulaciones O-OFDM en un soporte físico como es el NI USRP 2920. Para diseñar y simular estos sistemas se requirió de, unos conocimientos en sistemas de comunicaciones y del uso de un lenguaje de programación que no se había utilizado previamente. Ello llevó a que lo primero que se hizo fue buscar y estudiar la documentación de los sistemas de O-OFDM y la búsqueda de ejemplos en la aplicación LabVIEW.

Para comprobar que los sistemas iban funcionando se fue comprobando que, en los bloques de recepción, se recuperaba la información. Una vez con todos los bloques y sin añadir el ruido, se comprobó que, la salida era la misma que los datos de entrada. Una vez comprobado que los sistemas funcionaban, se añadió el ruido AWGN y se obtuvieron resultados de tasa de error de bit, además de hacer pruebas con diferentes potencias de nivel de DC o cálculos del espectro utilizado. Estos datos se comprueban con los datos teóricos de los artículos de referencia y se reflexiona sobre ellos. Para complementar el proyecto se concluyó con un resumen de todos los datos obtenidos, la comprobación de si se cumplían los objetivos y las futuras líneas de aplicación.

1.4.2. PLANIFICACION

Para desarrollar este proyecto y conseguir alcanzar los objetivos, se tomarán las siguientes pautas:

1º Elección y definición del proyecto- Conseguir un proyecto atractivo para el estudiante que permita al mismo estar a gusto con él. Así se conseguirá una mayor involucración y profundización en el proyecto.

2º Búsqueda y estudio de información sobre el tema de estudio- Este se puede decir que es el paso más importante. Consiste en recolectar la información sobre el tema que va a tratar y permite obtener los conocimientos necesarios para saber cómo debe realizarse el proyecto.

3º Búsqueda y aprendizaje de la herramienta a tratar- Se trata de la herramienta que se va a emplear a lo largo del proyecto y con la que no se ha trabajado previamente. Gracias a un estudio profundo antes de comenzar a programar, permitirá llegar a completar el desarrollo de los sistemas de la manera más rápida y correcta posible.

4º Diseño y simulación del proyecto- Lleva la mayor parte del tiempo del proyecto, debido a que se trata de la tarea donde se obtienen los datos con los que se va a trabajar. Una vez diseñados se realizará la simulación de los sistemas.

5º Comprobación y reajuste del diseño- Dado los estudios previos se puede saber de manera orientativa los valores que deberían salir. Por ello, si no coinciden dentro de un margen de error, se debe revisar el diseño para ver en qué se ha fallado o a que se debe. Esto permite solucionarlo o justificar el motivo de la diferencia entre los datos estimados que se pretende obtener y los obtenidos.

6º Recogida de datos- Una vez que el sistema funcione se simulará y tomará los datos para su posterior estudio.

7º Análisis y comparación- Usando los datos obtenidos se evaluarán los sistemas y se comparará sus características para decidir qué ventajas e inconvenientes aporta cada uno.

8º Redacción del proyecto- Mientras se trabaja en la obtención de todos los datos, se estudiará y redactará el proyecto.

9º Implementación en hardware- Para realizar un proyecto más completo, se investigará cómo se pasaría este sistema a un soporte físico para su uso.

10º Conclusión sobre los datos recogidos- Una vez alcanzado los conocimientos y los datos necesarios de las simulaciones. Se formulará las ideas y las conclusiones obtenidas, resumiendo y englobando todo el proyecto.

11º Revisión y reedición del proyecto- Dado que es muy difícil la creación de un documento en su primera edición, esta fase busca una relectura. Para conseguir encontrar fallos de redacción y conseguir la explicación de las ideas expuestas de la manera más lógica y legible posible.

1.5. ENTORNO SOCIOECONOMICO

La tecnología VLC ha nacido en un momento de avance tecnológico enorme en la que la sociedad necesita transmitir datos de manera continuada, ya sea para comunicarse con otras personas, uso de la nube para almacenar datos, gestionar y controlar dispositivos, etc. Dado que se busca una manera inalámbrica de conexión por la libertad de movimiento y ligado a las limitaciones de ancho de banda de los sistemas RF, VLC nos permite una alternativa rápida para conectar nuestros dispositivos. Se está estudiando cómo integrar esta tecnología a nuestra vida cotidiana pero aún no es una tecnología de uso comercial muy explotada debido al estado prematuro de desarrollo. Se prevé que, en unos años, dada la necesidad de transmitir los datos vía inalámbrica y la saturación en RF, esta tecnología pueda convertirse en un pilar de nuestra forma de comunicarnos. Además, una fabricación en serie de esta tecnología abaratará su precio. Uno de los potenciales usos de esta tecnología es la implementación de esta en las farolas de las *Smart cities* dado que permitirá dar servicio a los ciudadanos. Además, esta tecnología va a ser fundamental en lo que conocemos como el Internet de las cosas (*Internet of Things*, IoT)[5]. También se puede usar en entornos en los que la RF no está permitida. Esta tecnología cuenta con muy poca regulación para su uso debido a que no tiene muchas interferencias con señales colindantes, aunque ya se conocen varios estudios en los que el uso de una potencia o longitud de onda inadecuados pueden causar daños a las personas. Por todo esto hay lugares que ya han empezado a utilizarlo como ya explicaré en el apartado de ‘AREAS DE APLICACIÓN’.

2. ESTADO DEL ARTE

2.1. MARCO REGULADOR

La tecnología VLC está aún en desarrollo por lo que su regulación es menos estricta. Aun así, hay varios organismos que se han encargado de catalogar los daños y como transmitir con esta tecnología.

El Estándar actual es el **IEEE 802.15.7** [4] . Se definen una capa PHY y una capa MAC para comunicaciones inalámbricas ópticas de corto alcance que utilizan luz visible en medios ópticamente transparentes. Con este estándar se busca entregar velocidades de datos suficientemente altas para soportar servicios de multimedia de audio y video a la vez de proporcionar la movilidad del enlace visible. A pesar de ello esta tecnología en los umbrales incorrectos puede llegar a dañar a los seres vivos ya sean daños en la retina más relacionado con haces cerca de azul o en la piel más relacionado con haces de color rojo.

Esto ha llevado a que diversas organizaciones y organismos intenten implementar regulaciones necesarias para garantizar la seguridad de los ojos son elaboradas por:

CDRH [6] - *Center for Devices and Radiological Health* (Centro de dispositivos y salud radiológica).

CENELEC [7] -*European Committee for Electrotechnical Standardization* (Comité Europeo para la Estandarización Electrotécnica).

IEC [8]- *International Electrotechnical Commission* (Comisión internacional electrotécnica, con el comité encargado de la seguridad de radiación óptica).

ANSI [9]- *American National Standards Institute* (Instituto Nacional Americano de Estandarización).

Consiguiendo que el informe generado por los estudios realizados del IEC genere en función del grupo de riesgo definido en estas normas.

IEC 62471: describe todos los riesgos potenciales para la salud asociados a las radiaciones ópticas artificiales, desde el ultravioleta, visible e infrarrojo.

IEC/TR 62778: se centra en los daños causados en la retina derivado de la luz azul incluido principalmente en una porción en el espectro visible.

Esta norma busca el máximo de exposición que puede soportar el ojo o la piel para que no produzca daños biológicos. Para ello se basa en una clasificación de las luminarias en distintos grupos de riesgo.

-GRUPO 0 (EXENTO)

-GRUPO 1 (BAJO RIESGO)

-GRUPO 2 (RIESGO MODERADO)

-GRUPO 3 (ALTO RIESGO)

Para asegurar la integridad de las personas nos centraremos en las características de los dos primeros grupos de riesgo.

Grupo 0. Grupo Exento: La lámpara no representa ningún riesgo fotobiológico para los puntos extremos de la norma. Este requisito lo cumple cualquier lámpara que no represente:

- Un riesgo actínico ultravioleta (Es) en 500 minutos de exposición
- Un riesgo por ultravioleta cercano (EUVA) en 16.67 minutos
- Un riesgo en la retina debido a la luz azul (LB) en 166.67 minutos
- Un riesgo térmico retiniano (LR) en 0.17 minutos
- Un riesgo para el ojo por radiación infrarroja (EIR) en 16.67 minutos

Grupo 1. Bajo riesgo: La lámpara no representa un riesgo debido a las limitaciones normales de funcionamiento en la exposición. Este requisito lo cumple cualquier lámpara que exceda los límites del grupo exento pero que no represente:

- Un riesgo actínico ultravioleta (Es) en 166.67 minutos
- Un riesgo por ultravioleta cercano (EUVA) en 5 minutos
- Un riesgo retiniano por luz azul (LB) en 1.67 minutos
- Un riesgo para el ojo por radiación infrarroja (EIR) en 1.67 minutos

Asimismo, están en el grupo exento y grupo 1 de riesgo las lámparas que emiten radiación infrarroja sin un estímulo visual fuerte (es decir, menos de 10 cd m⁻²) y no representan un riesgo retiniano por radiación infrarroja cercana (LIR) en 1.67 minutos.

2.2. COMPARACION CON LOS SISTEMAS RADIO

Los sistemas de RF a **bajas frecuencias** son principalmente:

Bluetooth [10] que trabaja en la banda libre de 2,4 GHz y alcanza velocidades de 2 Mbps.

Wifi [11] en la banda de 5,7GHz con velocidades de 54Mbps teóricos en los que en media no superan los 22Mbps reales. Permitiendo una gran cobertura entre habitaciones y que a pesar de los obstáculos se mantiene un servicio óptimo, aunque no permite comunicación a grandes distancias.

Mientras que para las **altas frecuencias** se necesita una visión directa entre transmisor y receptor ya que los obstáculos producen una pérdida de servicio considerable y no permite transmitir a grandes distancias. Todo ello sin tener en cuenta el valor económico que produce por el encarecimiento de los componentes para trabajar a esas frecuencias perdiendo así las ventajas de cobertura y movilidad.

En cambio, los sistemas OWC usan un amplio espectro libre desde 700-10000nm que permite a esta tecnología, velocidades 42,8Gbps y distancias de hasta 5 km a través de infrarrojo. En cuanto a las desventajas, no puede traspasar obstáculos y en la actualidad el precio para poner esta tecnología es muy elevado.

Aunque a diferencia de RF, el aislamiento producido por no traspasar los obstáculos permite entre ellas reutilizar todo su espectro, consiguiendo anchos de banda mucho mayores a RF. Además, esta tecnología tiene aplicaciones como [12]:

- **GEOLiFi-** que permite localizar la posición de los usuarios a través de la luz
- **LiFi ONEWAY-** Transmite información de manera segura a los clientes
- **LiFi DUPLEX-** Sistema que permite conectarte a internet en alta velocidad

Esto convierte a los sistemas OWC en una alternativa perfecta, para el crecimiento de demanda de sistemas de comunicación con mayores velocidades e inalámbricos de los usuarios.

2.3. OWC

VLC es un sistema de comunicación inalámbrico vía luz. Se emplea en la zona del espectro visible a diferencia que la tecnología implantada por la Asociación de datos infrarrojos (*Infrared Data Association, IrDa*) que se centra en la zona de infrarrojos.

Aun así, ambas tecnologías se basan en las mismas bases del estándar IEE 802.15.7. Para los sistemas VLC se modula en función de su intensidad (señales reales y positivas) y en el receptor se realiza una detección directa de la potencia óptica recibida. Por ello se dice que los sistemas VLC están basados en Modulación de intensidad / detección directa (*Intensity modulation/direct detection, IM/DD*). Los principales esquemas de modulación empleados en VLC son los siguientes:

Modulación Encendido-Apagado (*On-Off Keying, OOK*) - Se basa en una transmisión sencilla que lo único que tiene en cuenta es una transmisión binaria mediante la detección de luz o ausencia de luz.

Modulación por amplitud de pulsos (*Pulse-Amplitude Modulation, PAM*) - En esta modulación el desfase y frecuencia se queda fijo y lo que varía es la amplitud.

Modulación por posición de pulso (*Pulse-Position Modulation, PPM*)- Se trata de una modulación que se basa en el envío de información en función de la posición del pulso de luz dentro de un intervalo de tiempo.

Estas modulaciones en sistemas de comunicación a través de luz proporcionan altas tasas de transmisión, aunque con técnicas monoportadoras e interferencia Intersimbólica (ISI). Por ello la realización de este proyecto donde mediante la modulación OFDM busco la técnica multiportadora que mejore estas comunicaciones. Para el funcionamiento de estos sistemas se necesita un LED que actuará como el transmisor y un fotodiodo (*Photodiode, PD*) que actuará como receptor.

También, VLC proporciona:

- **Mejor control de la interferencia** (la luz no atraviesa paredes).
- **Es una tecnología inocua** que no es perjudicial para el ser humano siempre que no sobrepasen los niveles de iluminación permitidos.
- **No hay interferencia con la RF** al utilizar otras bandas (de esta manera se pueden generar redes heterogéneas donde se aumente la eficiencia espectral).
- **Bandas de frecuencia de uso libre** sin necesidad de licencia para utilizarlas.
- **Bajo coste** ya que se fabrican con dispositivos que están al alcance de todos.

2.4. AREAS DE APLICACIÓN

Este siglo se ha convertido en la era de la tecnología, llevando a la industria a mostrar mayor interés por la tecnología OWC dando lugar a diversos ámbitos de aplicación, al aire libre o exterior (*outdoor*) e interior (*indoor*). Algunas áreas de aplicación donde esta tecnología proporciona ventajas son [12]:

En la minería, centrales- Gracias a un sistema de GEOLiFi y LiFiONEWAY permitirá procedimientos de seguridad como control de procesos, ubicación, etc. Utilizando la transmisión de información sin ondas de radio frecuencia donde en estos entornos no funciona.

En museos- Se puede transmitir la información de las guías y gracias a GEOLiFi puede dar la información en cada momento de forma exacta.

Hospitales- En los quirófanos es más habitual el uso de tecnología para realizar las operaciones y dado que los sistemas de comunicación por luz son menos vulnerables a la interferencia proporcionan una mayor seguridad respecto a RF.

Centros Comerciales- Gracias a los sistemas como GEOLiFi y LiFiONEWAY, cualquier empresa puede dar a los usuarios la información de los productos y ofertas.

Esto ha permitido que varias empresas hayan empezado a desarrollar esta tecnología como son:

- Shenzhen Twinkle Opto-Electronic Co. [13].
- Spm Lighting Co. [14].
- Hangzhou Frankever Electronic Co. [15].

3. DISEÑO DEL SISTEMA

El sistema tiene una parte de software que se lleva a cabo a través de NI LabVIEW, y una parte de hardware, basada en el NI USRP.

3.1. NI LABVIEW

3.1.1. DESCRIPCION DE LA APLICACIÓN

LabVIEW es un software de ingeniería. Esta herramienta salió al mercado en 1986 para funcionar en máquinas MAC. Ahora esta herramienta funciona en todas las plataformas ya sean Windows, UNIX, MAC y GNU/Linux.

Esta plataforma permite un entorno de desarrollo para crear sistemas que permite a los usuarios programar mediante código de bloques o escrito para conseguir crear diseños que permiten evaluar, controlar, simular... distintos elementos de los sistemas ingenieriles tanto en software como en hardware. El lenguaje principal con el que trabaja esta herramienta es lenguaje Grafico, aunque también permite un lenguaje escrito al permitir utilizar la sintaxis de archivos (.m).

3.1.2. ENTORNO LABVIEW

Este programa está diseñado para aplicaciones de control en equipos electrónicos. LabVIEW [16] crea programas y los almacena como (.vi) (Virtual Instrument). Estos programas se dividen fundamentalmente en dos partes: una parte visual donde se programa (diagrama de bloques) y la otra parte donde se introducen y se visualizan los datos (panel frontal).

El Diagrama de Bloques es la interfaz donde principalmente se programa. Ahí se encuentran los terminales que serán los datos de entrada y salida del sistema y que irán en el Panel Frontal. En él se encuentran las estructuras y elementos (elementos matemáticos, arrays, graficas, etc.) para poder programar. Todos ellos interconectados por cables que muestran el flujo de datos del programa.

Fig. 3.1 muestra algunas de las opciones en el diagrama de bloques. Estas opciones sirven para iniciar la simulación, pausarla y poner puntos de control o debug para ver si la aplicación se esta ejecutando correctamente. El elemento del final sirve para ordenar y limpiar el programa evitando errores de mala conexiones.

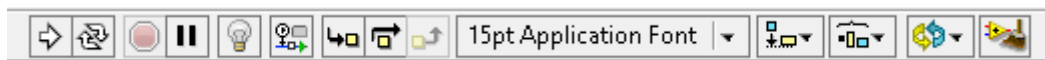


Fig. 3.1: Barra controladora de las ejecuciones de NI LabVIEW

Fig. 3.2 se encuentran los valores que pasaremos de entrada, los elementos operacionales y las estructuras que nos permitirán crear nuestro sistema.

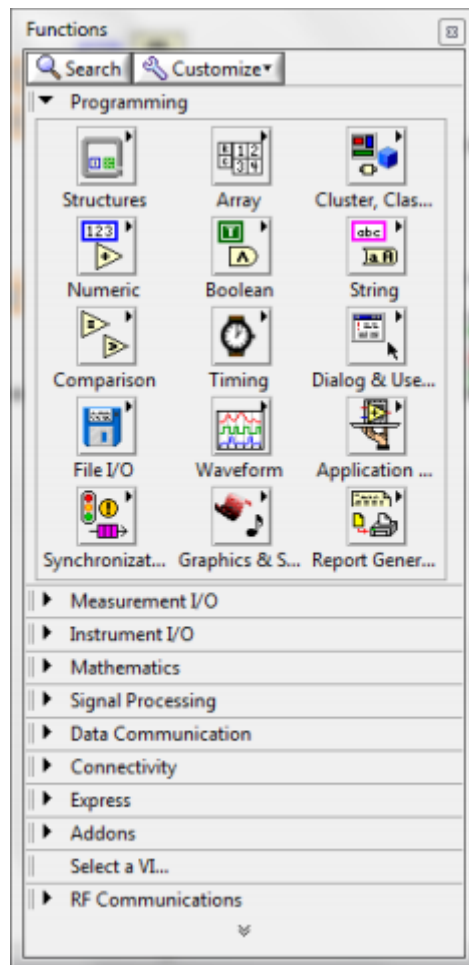


Fig. 3.2: Paleta de funciones de NI LabVIEW

Fig. 3.3 muestra un ejemplo de lo que se visualiza en la zona de programación, donde la variable Nsubpotadoras se trata del elemento de entrada. También hay una función interna que hace un logaritmo y el cuadrado el final es una estructura for para ejecutar un bucle.

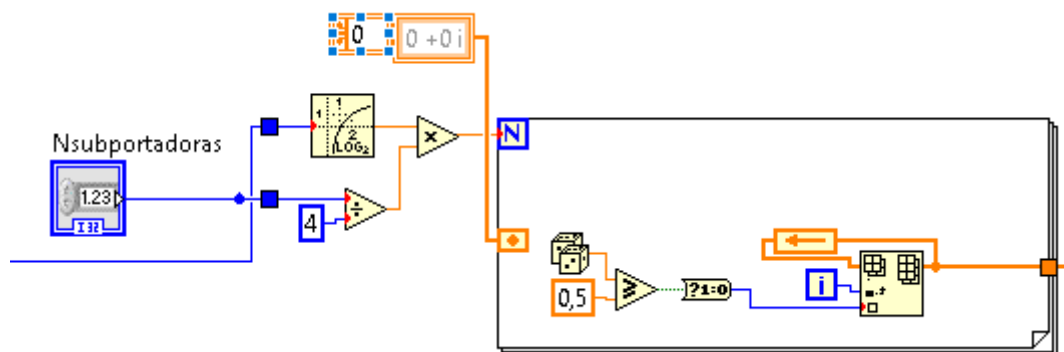


Fig. 3.3: Esquema de programación en NI LabVIEW

En cambio, el Panel Frontal es la interfaz que se encarga de modificar los valores de los datos de entrada y permite visualizar los datos de salida. Para los datos de entrada o datos de control usa elementos numéricos, pulsadores, etc, mientras que para los elementos de salida o indicadores puede tener valores numéricos, LEDs, gráficas, etc.

Fig. 3.2 se encuentran los elementos que vamos a necesitar para introducir los datos de entrada y para obtener los elementos de los valores de salida.

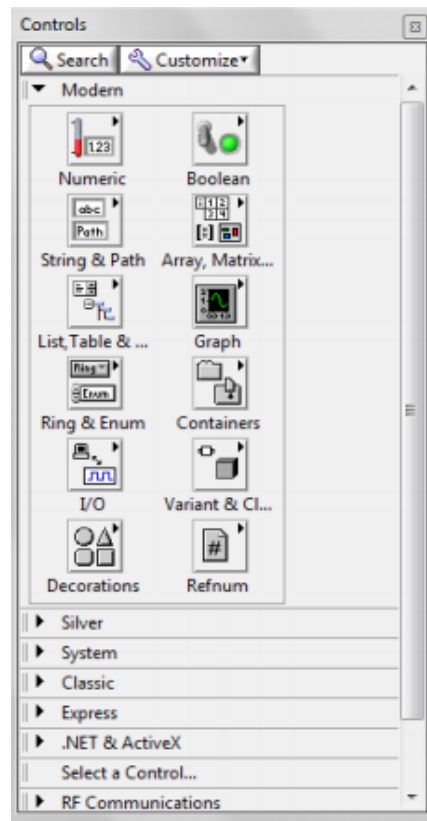


Fig. 3.4: Bloque de herramientas de NI LabVIEW

Fig. 3.5 es una visualización del panel frontal donde se observa dos datos de entrada y una gráfica para los valores de salida.

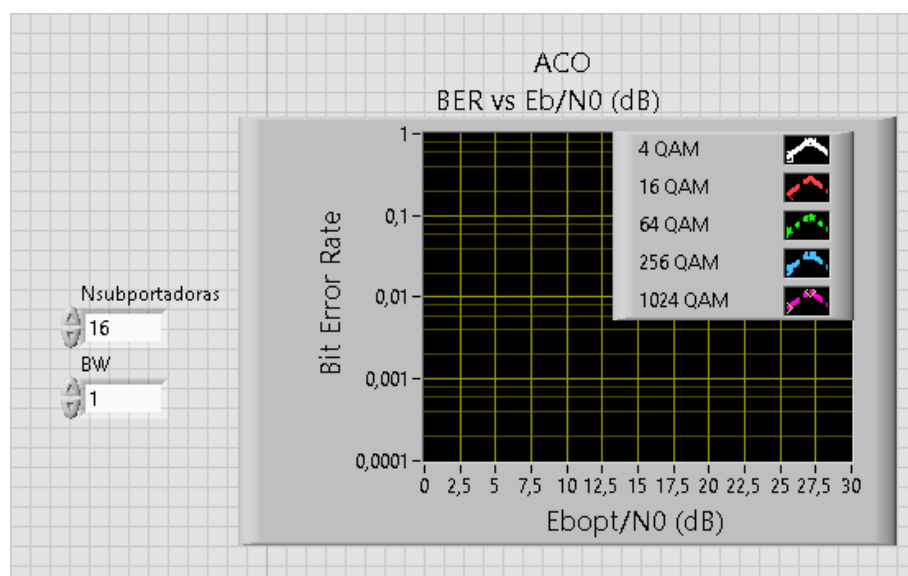


Fig. 3.5: Panel frontal de NI LabVIEW

3.3. JUSTIFICACION DE LA SOLUCION

Hemos elegido NI LABVIEW para realizar el estudio de las modulaciones ópticas OFDM porque este lenguaje de programación proporciona ventajas como:

- Incremento de velocidad gracias al compilador gráfico de este sistema.
- Posibilidad de implementar aplicaciones escritas de otros lenguajes.
- Esta herramienta también tiene grandes librerías que permiten adquirir y analizar los datos generados.
- Permite un fácil manejo en la interfaz con elementos externos y principalmente con los suyos propios.
- Facilita el desarrollo de aplicaciones ya que es una herramienta fácil e intuitiva.

4. DESARROLLO

En este apartado se pretende mostrar cómo funcionan las modulaciones O-OFDM elegidas, y cómo han sido implementadas a través de la herramienta LabVIEW. Para ello se usan los esquemas multiportadora que proporcionan una ventaja al poder transportar N portadoras en paralelo en el dominio de la frecuencia.

4.1. SISTEMA ACO-OFDM

ACO-OFDM es un esquema de modulación multiportadora empleada para VLC, que se trata de una variante del OFDM tradicional empleado en sistemas RF.

La parte del transmisor de este esquema de modulación se encuentra representada en las Fig. 4.1, Fig. 4.2, donde se refleja un diagrama de bloques y su correspondiente programación llevada a cabo en este trabajo. En primer lugar, se recogen los bits de datos a transmitir y lo divide en bloques de $N/4$ símbolos OFDM con modulación M-QAM de valores $S(k) = [S_0, S_1, \dots, S_{N/4-1}]$. Para ello se introduce en un bloque de LabVIEW que convierte los datos de entrada en unos datos de salida en función del orden de constelación elegido. Después se convierte la señal de serie a paralelo y se distribuye en una matriz hermítica. Para ello se conjuga los datos y se añaden de manera inversa con ceros en las posiciones pares

$$X(k) = [0, S_0, 0, S_1, 0, S_2, \dots, 0, S_{N/4-1}, 0, S_{N/4-1}^*, 0, S_{N/4-2}^*, \dots, 0, S_0^*]$$

quedando un tamaño de (N).

La Transformada de Fourier inversa (*Inverse fast Fourier transform*, IFFT), tiene como cometido convertir la señal del dominio de la frecuencia al dominio temporal. Realizando una simetría hermítica de los símbolos a la entrada de la IFFT conseguimos que la señal en el dominio del tiempo esté formada únicamente por muestras reales, lo cual es necesario para VLC ya que esa señal es la intensidad que únicamente puede ser real y positiva. La consecución de una señal positiva, una vez que tenemos una señal real, es gracias a un recorte de las muestras negativas, tal y como se explica más adelante.

Se convierte el vector columna a un vector fila o más coloquialmente de paralelo a serie y añadimos prefijo cíclico que garantizará una sincronización y disminuirá el efecto del multitrayecto en la recepción. Estos pasos en el software LabVIEW no aportan ninguna modificación en el sistema a la hora de simular por lo que no es necesario añadirlos. Después se realiza un recorte que consiste en eliminar los valores negativos y convertirlos en cero. Dado que los sistemas de luz sólo tienen valores reales y positivos, este recorte de la señal en 0 garantiza que la señal en el dominio del tiempo contenga únicamente valores positivos. Este recorte de la señal no implica una pérdida de información útil ya que los símbolos en tiempo de los sistemas ACO-OFDM llevan una simetría por la cual a cada valor positivo le corresponde un valor negativo de igual amplitud.

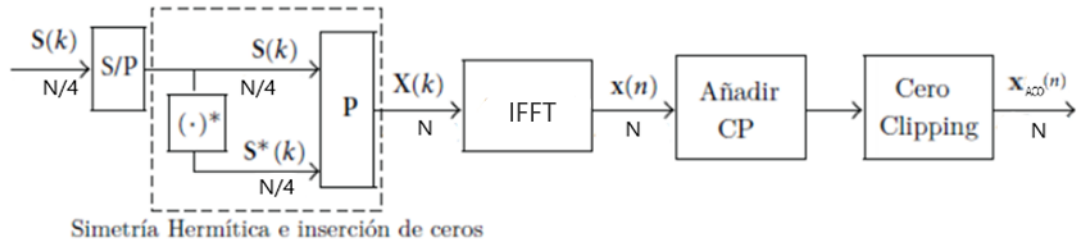


Fig. 4.1: Esquema de transmisor ACO-OFDM [5]

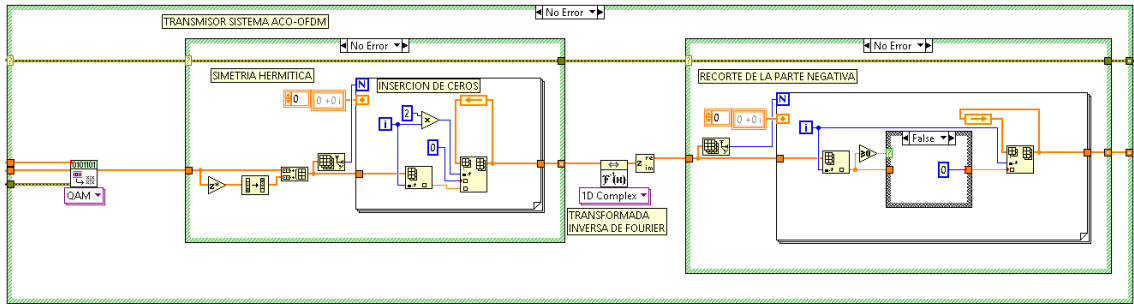


Fig. 4.2: Programación del transmisor ACO-OFDM en LabVIEW

La señal se pasa de digital a analógico para transmitir en la parte óptica. Modulando en intensidad y transmitiendo por un diodo led o laser.

Esta parte solo es necesaria a la hora de la implementación real, aunque para el diseño del sistema para la simulación y el estudio de las características de este sistema no aporta ningún cambio.

Se trabaja con un canal AWGN, es decir, que el ruido que se añade a la señal transmitida es blanco, auditivo y gaussiano. El ruido que se añade es real con muestras positivas y negativas. Como nuestro objetivo es estudiar el rendimiento de estos esquemas de modulación para diferentes valores de SNR, la potencia de ruido para cada valor de SNR se calcula de la siguiente manera:

$$SNR = \frac{SEÑAL}{RUIDO} = \frac{R_b E_b}{B N_0} \Rightarrow N_{ACO} = \frac{S B}{\frac{E_{b(opt)}}{N_0} R_{bACO}} \quad (4.1)$$

Donde la tasa de bit viene dada por:

$$R_{bACO} = \frac{\log_2(M)}{2(1+\frac{2}{N})} \quad (4.2)$$

Siendo M la modulación, N el número de subportadoras, B el ancho de banda normalizado, $E_{b(opt)}$ la energía de bit óptica, N_0 la densidad espectral de potencia del ruido y S la potencia de la señal óptica dada por: $S=E\{x\}$, donde x es la señal transmitida.

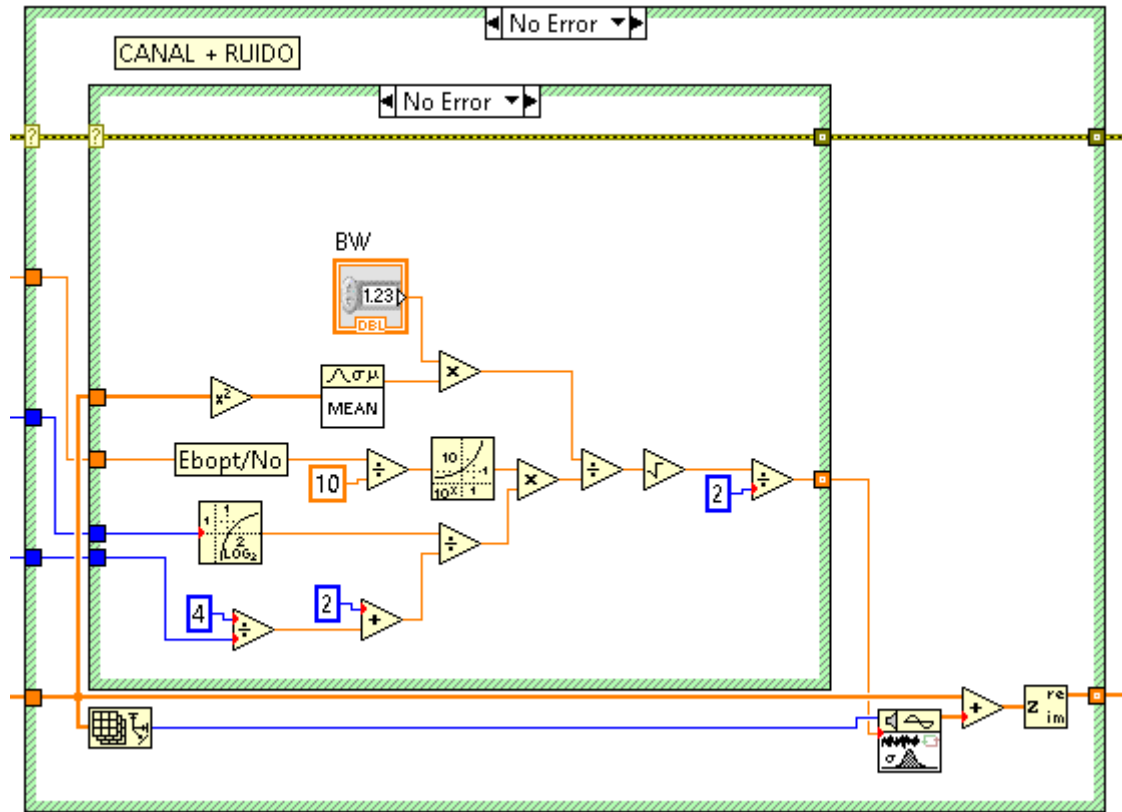


Fig. 4.3: Programación de canal + ruido sistema ACO-OFDM en LabVIEW

Una vez transmitido y añadido el ruido se reciben en el receptor y se muestrea la señal analógica pasando a la señal de eléctrica de nuevo.

$$y_{ACO}[n] = x_{ACO}[n] + n_{ACO} \quad (4.3)$$

Se retiraría el prefijo cíclico y se pasaría de serie a paralelo. Aunque como ya expliqué antes este paso para la simulación de los datos no aporta nada por lo que no se incorporará. Se realizará la Transformada de Fourier (*fast Fourier transform*, FFT) para así obtener $Y(k)$. Después convertimos de paralelo a serie y dado que llega la señal transmitida dividida por dos respecto a la $x[n]$ tras retirar los ceros en las posiciones pares y la segunda mitad de la señal debido a que es la conjugada de la primera, debemos ecualizar el canal y multiplicar por un factor de 2. Consiguiendo recuperar la señal transmitida con la modificación por ruido.

La Fig. 4.4 muestra cómo quedaría el esquemático del sistema completo desde el transmisor, canal + ruido y el receptor. Consiguiendo generar una vista general del sistema ACO-OFDM

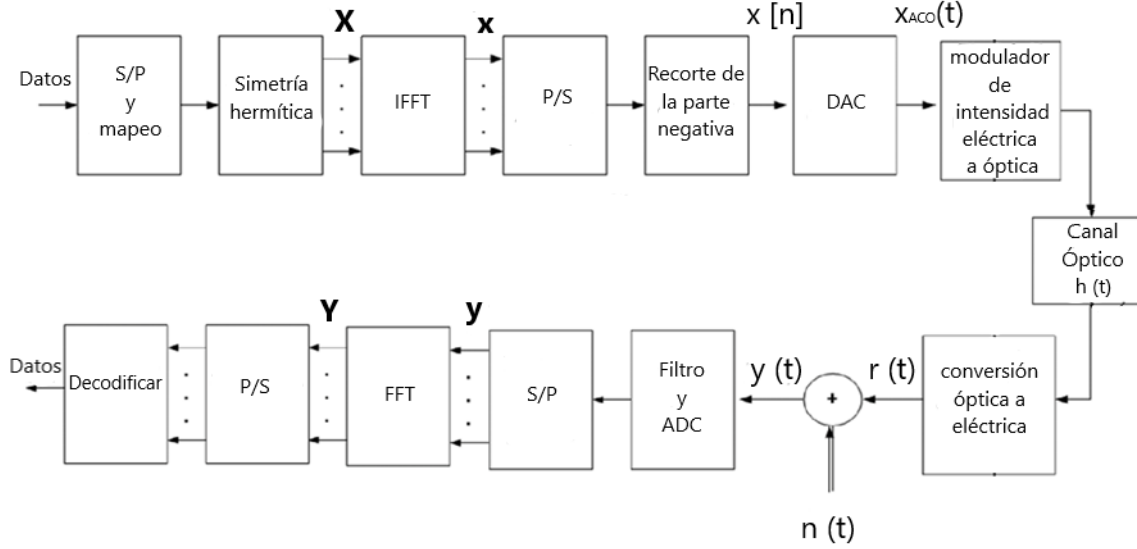


Fig. 4.4: Esquema del sistema ACO-OFDM completo [5]

4.2. SISTEMA U-OFDM

U-OFDM es un esquema de modulación multiportadora empleada para VLC, que se trata de una variante del OFDM tradicional empleado en sistemas RF.

La parte del transmisor de este esquema de modulación se encuentra representada en las Fig. 4.7, Fig. 4.8, donde se refleja un diagrama de bloques y su correspondiente programación llevada a cabo en este trabajo. En primer lugar, se recogen los bits de datos a transmitir y lo divide en bloques de $N/2-1$ símbolos OFDM con modulación M-QAM de valores $S(k) = [S_0, S_1, \dots, S_{N/2-2}]$. Para ello se introduce en un bloque de LabVIEW que convierte los datos de entrada en unos datos de salida en función del orden de constelación elegido. Después se convierte la señal de serie a paralelo y se distribuye en una matriz hermítica. Para ello se conjuga los datos y se añaden de manera inversa con ceros en la primera e intermedia posición

$$X(k) = [0, S_0, S_1, S_2, \dots, S_{N/2-2}, 0, S_{N/2-2}^*, S_{N/2-3}^*, \dots, S_0^*]$$

quedando un tamaño de N.

La Transformada de Fourier inversa IFFT, tiene como cometido convertir la señal del dominio de la frecuencia al dominio temporal. Realizando una simetría hermítica de los símbolos a la entrada de la IFFT conseguimos que la señal en el dominio del tiempo esté formada únicamente por muestras reales, lo cual es necesario para VLC ya que esa señal es la intensidad que únicamente puede ser real y positiva. La consecución de una señal positiva, una vez que tenemos una señal real, es gracias a dividir el sistema en dos vectores uno con los valores únicamente positivos y otro con los valores negativos cambiando de signo. Se convierte el vector columna a un vector fila o más coloquialmente de paralelo a serie y añadimos prefijo cíclico que garantizará una sincronización y disminuirá el efecto del multitrayecto en la recepción. Estos pasos en el software LabVIEW no aportan ninguna modificación en el sistema a la hora de simular por lo que no es necesario añadirlos. Después se realiza el cambio de vector real a vector real positivo como se representa en Fig. 4.5 y Fig. 4.6.

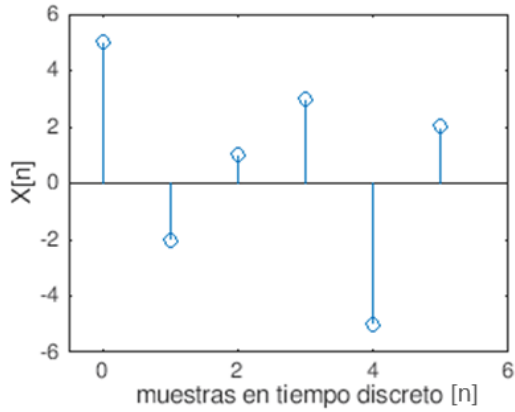


Fig. 4.5 : Señal $x[n]$ [18]

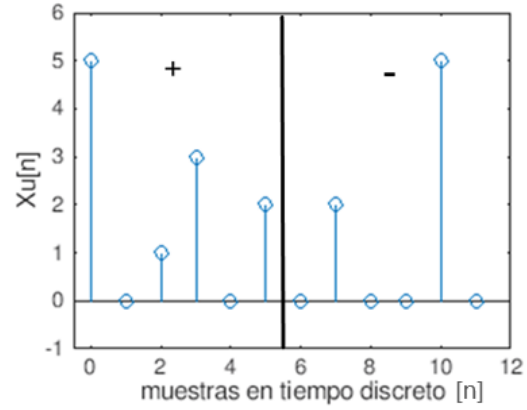


Fig. 4.6 : Señal $x[n]$ tras la conversion a U-OFDM

Dado que los sistemas de luz sólo tienen valores reales y positivos, esta modificación de la señal en valores positivos garantiza que la señal en el dominio del tiempo contenga únicamente valores positivos. Aunque con la desventaja de duplicar el tiempo de transmisión de la señal.

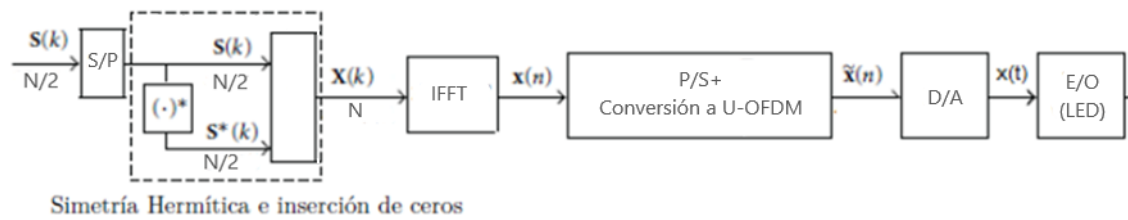


Fig. 4.7 : Esquema de transmisor U-OFDM

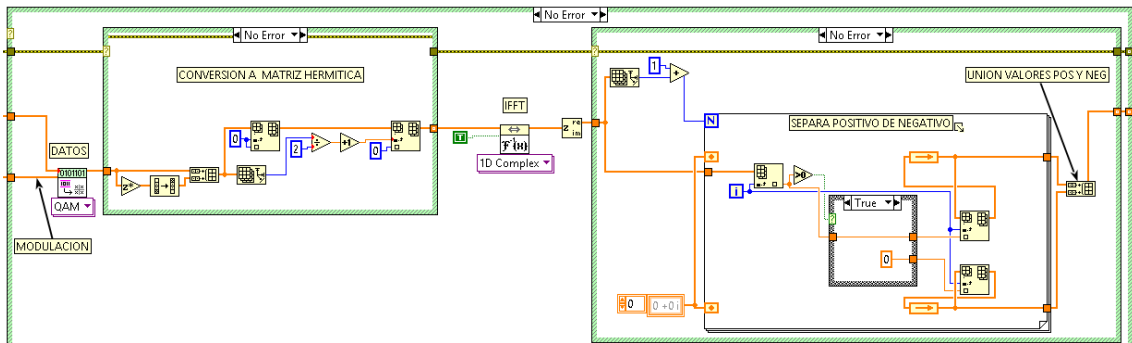


Fig. 4.8 : Programación del transmisor U-OFDM en LabVIEW

La señal se pasa de digital a analógico para transmitir en la parte óptica. Modulando en intensidad y transmitiendo por un diodo LED o laser.

Esta parte sólo es necesaria a la hora de la implementación real, aunque para el diseño del sistema para la simulación y el estudio de las características de este sistema no aporta ningún cambio.

Se trabaja con un canal AWGN, es decir, que el ruido que se añade a la señal transmitida es blanco, auditivo y gaussiano. El ruido que se añade es real con muestras positivas y negativas. Como nuestro objetivo es estudiar el rendimiento de estos esquemas de modulación para diferentes valores de SNR, la potencia de ruido para cada valor de SNR se calcula de la siguiente manera:

$$SNR = \frac{SEÑAL}{RUIDO} = \frac{R_b E_b}{B N_0} \Rightarrow N_U = \frac{S B}{\frac{E_{b(opt)}}{N_0} R_{bU}} \quad (4.4)$$

Donde la tasa de bit viene dada por:

$$R_{bU} = \frac{\log_2(M)}{2(1 + \frac{2}{N})} \quad (4.5)$$

Siendo M el orden de la constelación, N el número de subportadoras, B el ancho de banda normalizado, $E_{b(opt)}$ la energía de bit óptica, N_0 la densidad espectral de potencia del ruido y S la potencia de la señal óptica dada por: $S = E\{x\}$, donde x es la señal transmitida.

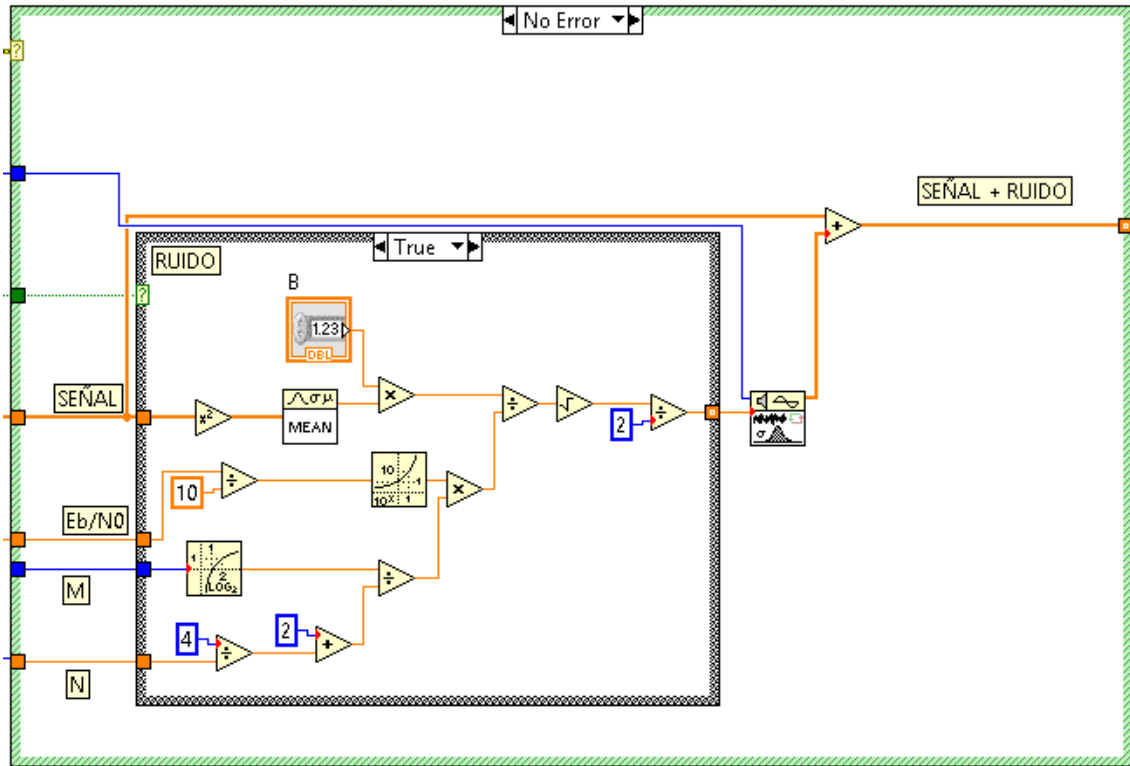


Fig. 4.9: Programación de canal + ruido sistema U-OFDM en LabVIEW

Una vez transmitido y añadido el ruido se reciben en el fotodetector y se muestrea la señal analógica pasando a la señal de eléctrica de nuevo.

$$y_U[n] = x_U[n] + n_U \quad (4.6)$$

Se retiraría el prefijo cíclico y se pasaría de serie a paralelo. Aunque como ya expliqué antes este paso para la simulación de los datos no aporta nada por lo que no se incorporará. Reconvertimos la señal uniendo el primer vector con el segundo cambiando de signo y pasamos de serie a paralelo para realizar la FFT y así obtener $Y(k)$. Después convertimos de paralelo a serie.

Se retiran los elementos en la posición cero, intermedia y la segunda mitad ya que es la conjugada de la primera. Consiguiendo recuperar la señal transmitida con la modificación por ruido.

La Fig. 4.10 muestra cómo quedaría el esquemático del sistema completo desde el transmisor, canal + ruido y el receptor. Consiguiendo generar una vista general del sistema U-OFDM

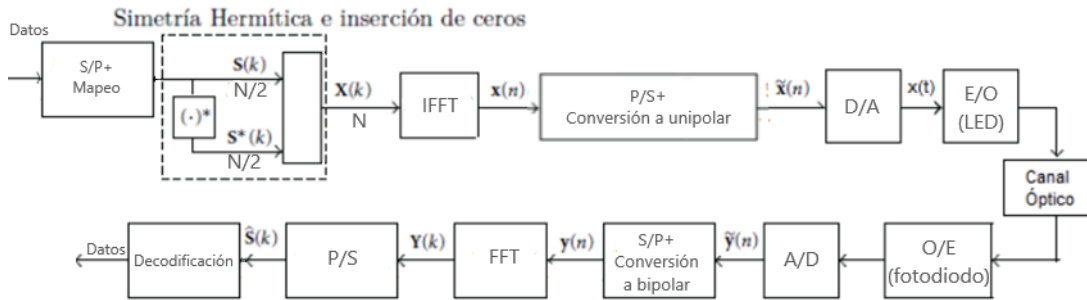


Fig. 4.10: Esquema del sistema U-OFDM completo

4.3. SISTEMA DCO-OFDM

DCO-OFDM es un esquema de modulación multiportadora empleada para VLC, que se trata de una variante del OFDM tradicional empleado en sistemas RF.

La parte del transmisor de este esquema de modulación se encuentra representada en las Fig. 4.16, donde se refleja un diagrama de bloques y su correspondiente programación llevada a cabo en este trabajo. En primer lugar, se recogen los bits de datos a transmitir y lo divide en bloques de $N/2-1$ símbolos OFDM con modulación M-QAM de valores $S(k) = [S_0, S_1, \dots, S_{N/2-2}]$. Para ello se introduce en un bloque de LabVIEW que convierte los datos de entrada en unos datos de salida en función del orden de constelación elegido. Después se convierte la señal de serie a paralelo y se distribuye en una matriz hermítica. Para ello se conjuga los datos y se añaden de manera inversa con ceros en la primera e intermedia posición

$$X(k) = [0, S_0, S_1, S_2, \dots, S_{N/2-2}, 0, S_{N/2-2}^*, S_{N/2-3}^*, \dots, S_0^*]$$

quedando un tamaño de N .

La Transformada de Fourier inversa (IFFT), tiene como cometido convertir la señal del dominio de la frecuencia al dominio temporal. Realizando una simetría hermítica de los

símbolos a la entrada de la IFFT conseguimos que la señal en el dominio del tiempo esté formada únicamente por muestras reales observable en Fig. 4.11, Fig. 4.13, lo cual es necesario para VLC ya que esa señal es la intensidad que únicamente puede ser real y positiva. La consecución de una señal positiva, una vez que tenemos una señal real, es gracias a la suma de una constante, tal y como se explica más adelante.

Se convierte el vector columna a un vector fila o más coloquialmente de paralelo a serie y añadimos prefijo cíclico que garantizará una sincronización y disminuirá el efecto del multitrayecto en la recepción. Estos pasos en el software LabVIEW no aportan ninguna modificación en el sistema a la hora de simular por lo que no es necesario añadirlos. Después se le suma la constante B_{DC} que consiste en añadir a nuestra señal una constante convirtiendo los valores negativos en positivo o casi dependiendo de la señal sumada como se puede ver en Fig. 4.12, Fig. 4.14.

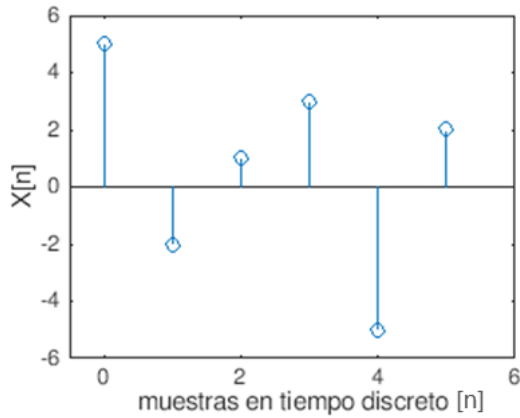


Fig. 4.11: Señal $x[n]$ [18]

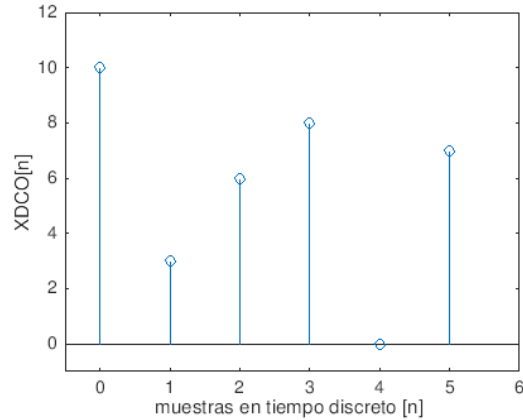


Fig. 4.12 : Señal $x[n]$ tras la suma del B_{DC} [18]

Esta se da en valores de k y depende de la señal de esta manera:

$$B_{DC} = 10 \log_{10}(k^2 + 1) \quad (4.7)$$

Dado que los sistemas de luz sólo tienen valores reales y positivos, esta suma de la constante garantiza que la señal en el dominio del tiempo contenga únicamente valores positivos. Aunque, en valores de k bajos puede no llegar a convertirlos a positivos del todo como Fig. 4.14. Por ello, se realiza un recorte como en el sistema ACO-OFDM ya mencionando anteriormente consiguiendo dejar la señal solo con elementos positivos como Fig. 4.15. Este recorte de la señal puede implicar una pérdida de información útil ya que los símbolos en tiempo dependen del incremento realizado por el B_{DC} . Se observa que en la Fig. 4.15 se pierden los datos que se encuentran en el cuarto elemento.

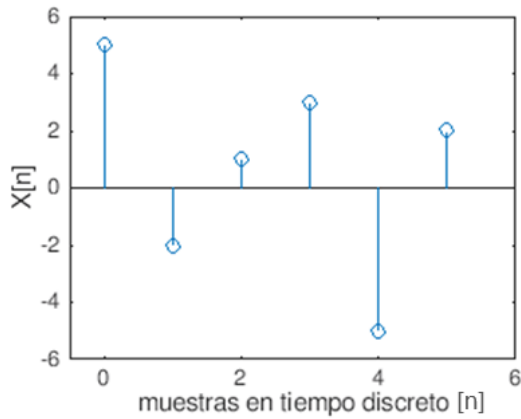


Fig. 4.13 : Señal $x[n]$

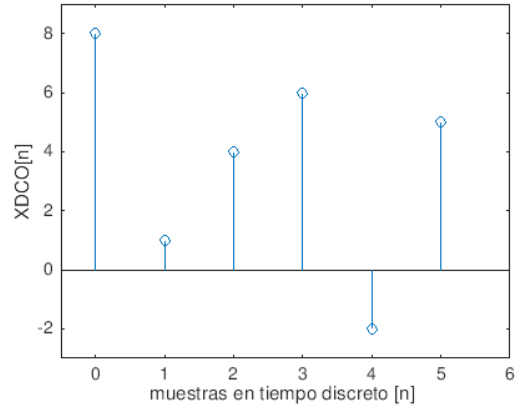


Fig. 4.14 : Señal $x[n]$ tras la suma del B_{DC}

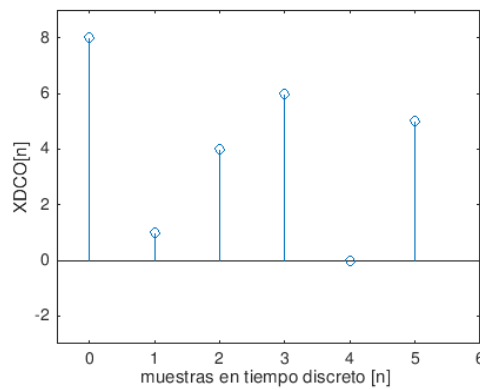


Fig. 4.15 : Señal $x[n]$ tras la suma del B_{DC} y el recorte de la parte negativa

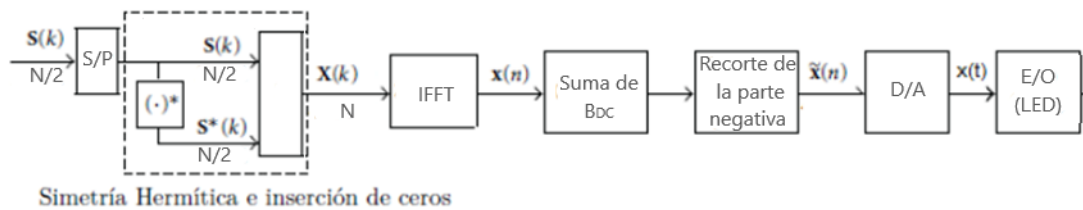


Fig. 4.16 : Esquema de transmisor DCO-OFDM [5]

La señal se pasa de digital a analógico para transmitir en la parte óptica. Modulando en intensidad y transmitiendo por un diodo LED o láser.

Esta parte sólo es necesaria a la hora de la implementación real, aunque para el diseño del sistema para la simulación y el estudio de las características de este sistema no aporta ningún cambio.

Se trabaja con un canal AWGN, es decir, que el ruido que se añade a la señal transmitida es blanco, auditivo y gaussiano. El ruido que se añade es real con muestras positivas y negativas. Como nuestro objetivo es estudiar el rendimiento de estos esquemas de

modulación para diferentes valores de SNR, la potencia de ruido para cada valor de SNR se calcula de la siguiente manera:

$$SNR = \frac{SEÑAL}{RUIDO} = \frac{R_b E_b}{B N_0} \Rightarrow N_{DCO} = \frac{S B}{\frac{E_{b(opt)}}{N_0} R_{bDCO}} \quad (4.8)$$

Donde la tasa de bit viene dada por:

$$R_{bDCO} = \frac{\log_2(M)}{(1 + \frac{2}{N})} \quad (4.9)$$

Siendo M la modulación, N el número de subportadoras, B el ancho de banda normalizado, $E_{b(opt)}$ la energía de bit óptica, N_0 la densidad espectral de potencia del ruido y S la potencia de la señal óptica dada por: $S=E\{x\}$, donde x es la señal transmitida.

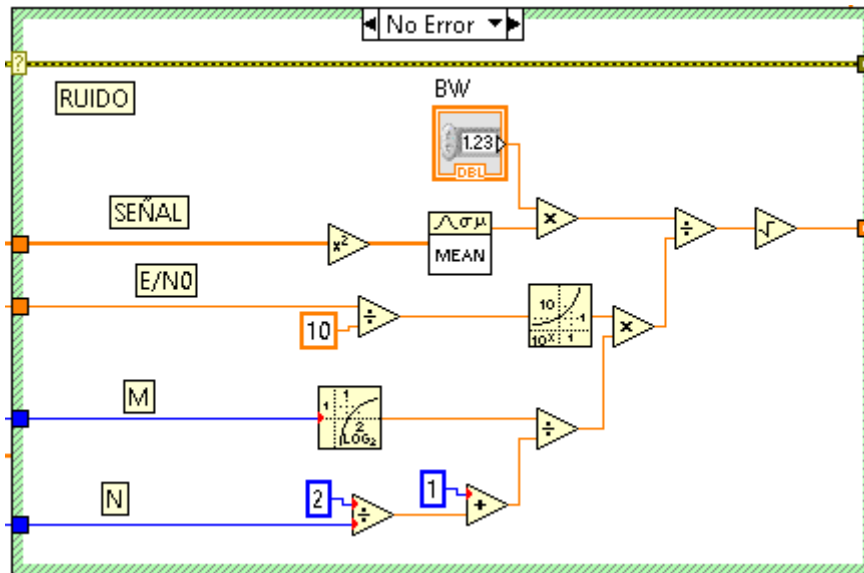


Fig. 4.17 : Programación de canal + ruido del sistema DCO-OFDM en LabVIEW

Una vez transmitido y añadido el ruido se reciben en el fotodetector y se muestrea la señal analógica pasando a la señal de eléctrica de nuevo.

$$y_{DCO}[n] = x_{DCO}[n] + n_{DCO} + B_{DC} \quad (4.10)$$

Se retiraría el prefijo cíclico y se pasaría de serie a paralelo. Aunque como ya expliqué antes este paso para la simulación de los datos no aporta nada por lo que no se incorporará. Dado que la suma de una señal constante en tiempo es una delta en la primera posición en frecuencia no afecta a la señal, esto permite recuperar la señal sin necesidad de hacer ningún proceso de reconstrucción en el receptor.

Se retiran los elementos en la posición cero, intermedia y la segunda mitad ya que es la conjugada de la primera. Consiguiendo recuperar la señal transmitida con la modificación por ruido.

La Fig. 4.18 muestra cómo quedaría el esquemático del sistema completo desde el transmisor, canal + ruido y el receptor. Consiguiendo generar una vista general del sistema DCO-OFDM

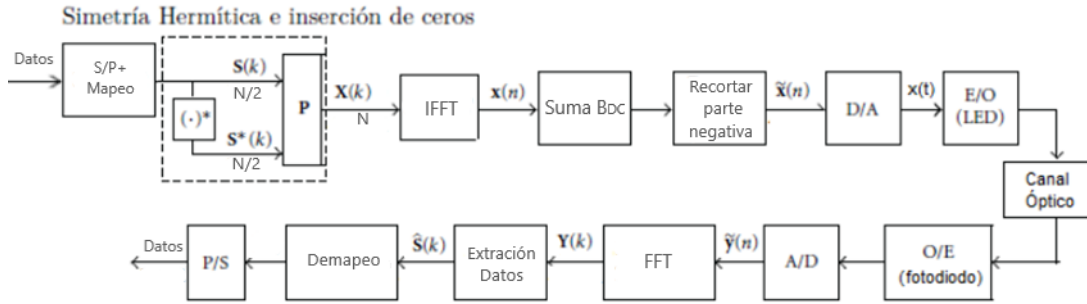


Fig. 4.18 : Esquema del sistema completo DCO-OFDM [5]

4.4. SISTEMA ADO-OFDM

ADO-OFDM es un esquema de modulación multiportadora empleada para VLC, que se trata de una variante del OFDM tradicional empleado en sistemas RF.

Este sistema se basa en una combinación del sistema ADO-OFDM Y DCO-OFDM ya explicados anteriormente y busca una alternativa en la que se puedan mejorar los sistemas anteriores.

La parte del transmisor de este esquema de modulación se encuentra representada en las Fig. 4.19, Fig. 4.20, donde se refleja un diagrama de bloques y su correspondiente programación llevada a cabo en este trabajo. En primer lugar, se recogen los bits de datos a transmitir y lo divide en bloques de N_{ADO} donde se generan $N_{ACO} = N_{ADO} / 8$ y $N_{DCO} = N_{ADO} / 4 - 1$ símbolos OFDM con modulación M_{ACO} -QAM y M_{DCO} -QAM de valores $X(k) = [X_0, X_1, \dots, X_{N_{ADO}/2-1}]$. Para ello se introduce en dos bloques de LabVIEW que convierte los datos de entrada en unos datos de salida en función de los órdenes de constelación elegido. Después se convierte la señal de serie a paralelo y se distribuye en una matriz hermítica. Para ello se conjuga los datos y se añaden de manera inversa. Para distribuir las subportadoras de manera que el sistema funcione se separan los datos en impares y pares. Con los datos impares y añadiendo ceros en las posiciones pares se consigue la estructura necesaria para el sistema ACO-OFDM. Con los datos pares y añadiendo ceros en las posiciones impares se consigue la estructura necesaria para el sistema DCO-OFDM.

$$X_{odd}(k) = [0, X_1, 0, X_3, 0, \dots, 0, X_{N_{ADO}/2-1}]$$

$$X_{even}(k) = [X_0, 0, X_2, 0, \dots, X_{N_{ADO}/2-2}, 0]$$

Quedando un tamaño de $N_{ADO} / 2$ en la parte del sistema ACO-OFDM y $N_{ADO} / 2$ en la parte del sistema ACO-OFDM.

La IFFT tiene como cometido convertir la señal del dominio de la frecuencia al dominio temporal, en cada una de las partes, obteniendo un resultado de valores reales a la salida de cada uno de los bloques de la IFFT. Después, se cogen los datos de la salida de la IFFT de X_{odd} y dado que van relacionados con el sistema ACO-OFDM. Se convierte el vector columna a un vector fila o técnicamente más de paralelo a serie y añadimos prefijo cíclico que garantizará una sincronización y disminuirá el efecto del multitrayecto en la recepción. Estos pasos en el

software LabVIEW no aportan ninguna modificación en el sistema a la hora de simular por lo que no es necesario añadirlos. Después se realiza un recorte que consiste en eliminar los valores negativos y convertirlos en cero. Dado que los sistemas de luz sólo tienen valores reales y positivos, este recorte de la señal en 0 garantiza que la señal en el dominio del tiempo contenga únicamente valores positivos. Este recorte de la señal no implica una pérdida de información útil ya que los símbolos en tiempo de los sistemas ACO-OFDM llevan una simetría por la cual a cada valor positivo le corresponde un valor negativo de igual amplitud. Luego se extraen los datos de la salida de la IFFT de X_{even} y dado que van relacionados con el sistema DCO-OFDM.

Después se la suma la constante B_{DC} que consiste en añadir a nuestra señal una constante convirtiendo los valores negativos en positivo o casi dependiendo de la señal sumada.

Esta se da en valores de k y depende de la señal de esta manera:

$$B_{DC} = 10 \log_{10}(k^2 + 1) \quad (4.11)$$

Dado que los sistemas de luz sólo tienen valores reales y positivos, esta suma de la constante garantiza que la señal en el dominio del tiempo contenga únicamente valores positivos. Aunque, en valores de k bajos puede no llegar a convertirlos a positivos del todo. Por ello, se realiza un recorte como en el sistema ACO-OFDM ya mencionando anteriormente consiguiendo dejar la señal solo con elementos positivos. Este recorte de la señal puede implicar una pérdida de información útil ya que los símbolos en tiempo dependen del incremento realizado por el B_{DC} .

Luego pasamos de paralelo a serie y sumamos las dos modulaciones de manera que queda... le añadimos prefijo cíclico. La señal se pasa de digital a analógico para transmitir en la parte óptica. Modulando en intensidad y transmitiendo por un diodo led o laser. Esta parte solo es necesaria a la hora de la implementación real, aunque para el diseño del sistema para la simulación y el estudio de las características de este sistema no aporta ningún cambio.

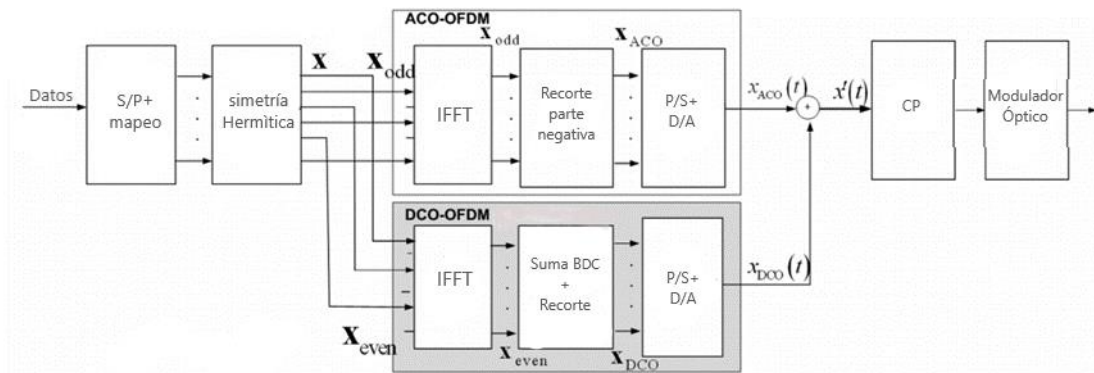


Fig. 4.19: Esquema de transmisor ADO-OFDM

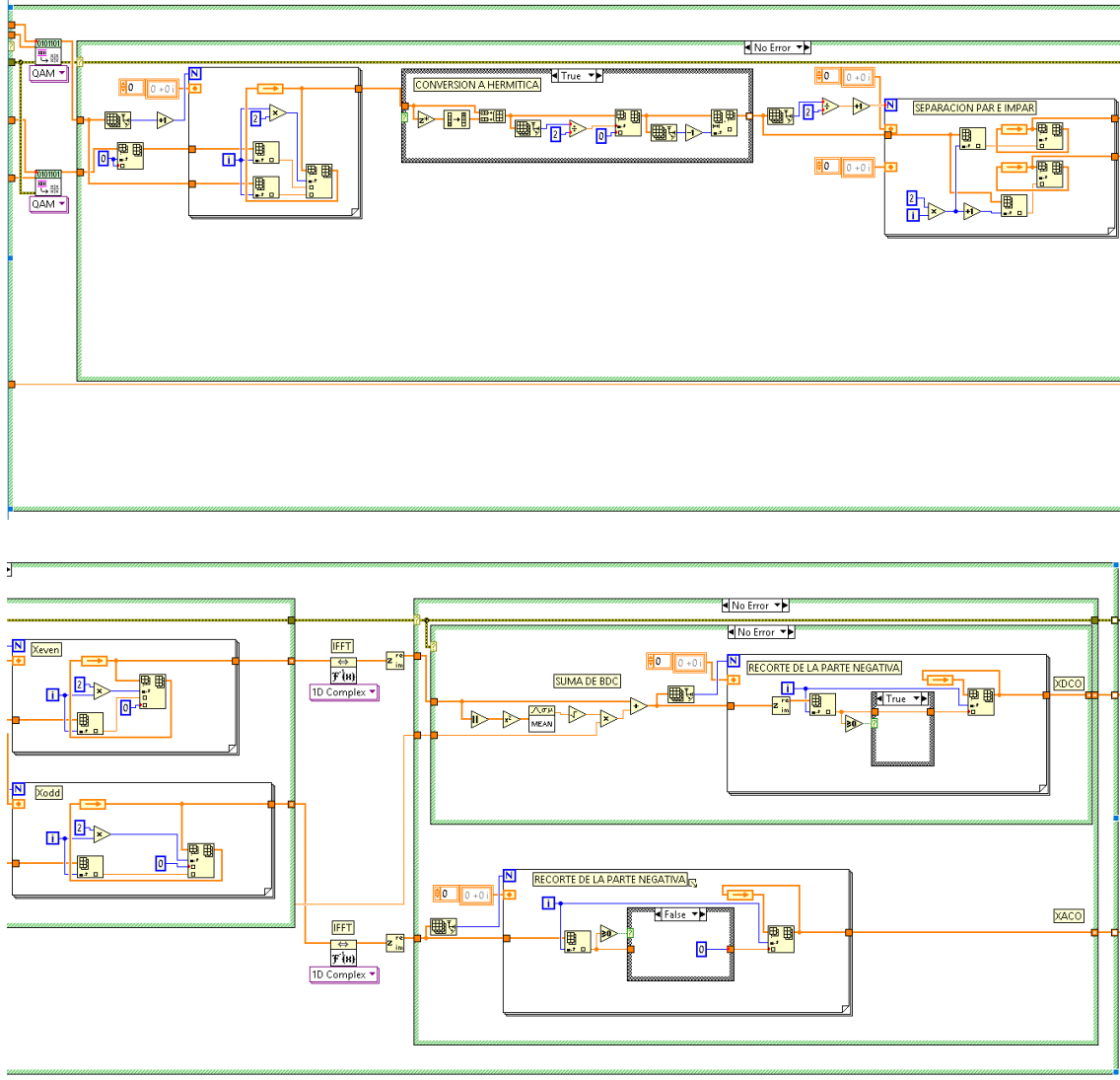


Fig. 4.20: Programación del transmisor ADO-OFDM en LabVIEW

Se trabaja con un canal AWGN, es decir, que el ruido que se añade a la señal transmitida es blanco, auditivo y gaussiano. El ruido que se añade es real con muestras positivas y negativas. Como nuestro objetivo es estudiar el rendimiento de estos esquemas de modulación para diferentes valores de SNR, la potencia de ruido para cada valor de SNR se calcula de la siguiente manera:

$$SNR = \frac{SEÑAL}{RUIDO} = \frac{R_b E_b}{B N_0} \Rightarrow N_{ADO} = \frac{S B}{\frac{E_{b(opt)}}{N_0} R_{bADO}} \quad (4.12)$$

Donde la tasa de bit viene dada por [2]:

$$R_{bADO} = \frac{(\log_2(M_{ACO}) + \log_2(M_{DCO}))/2}{(1 + \frac{2}{N})} \quad (4.13)$$

Siendo M_{ACO} , M_{DCO} los órdenes de las constelaciones utilizados en ACO-OFDM y DCO-OFDM pertenecientes a este sistema ADO-OFDM, N el número de subportadoras, B el ancho de banda normalizado, $E_{b(opt)}$ la energía de bit óptica, N_0 la densidad espectral de potencia del ruido y S la potencia de la señal óptica dada por: $S=E\{x\}$, donde x es la señal transmitida.

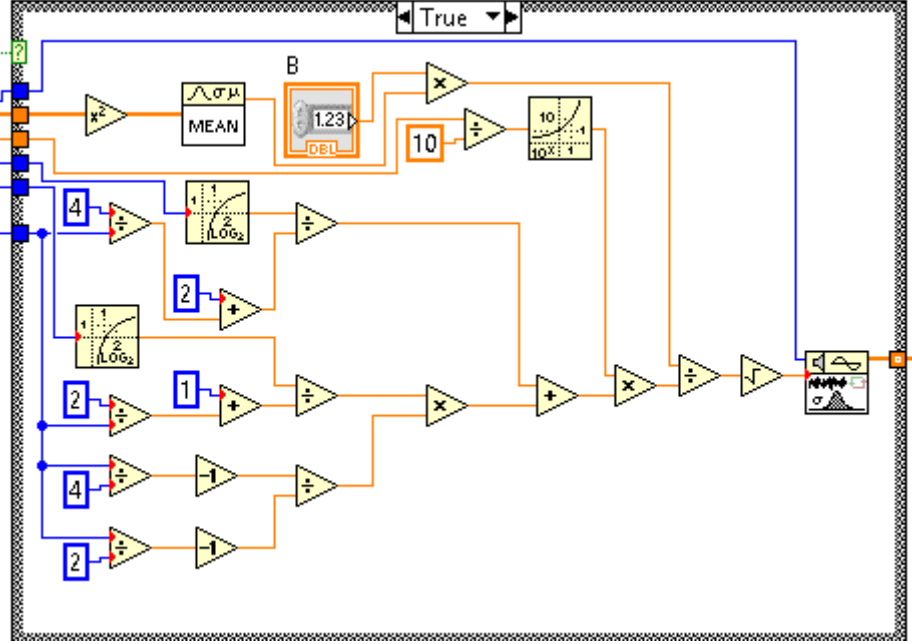


Fig. 4.21: Programación de canal + ruido del sistema ADO-OFDM en LabVIEW

Una vez transmitido y añadido el ruido se reciben en el receptor y se muestrea la señal analógica pasando a la señal eléctrica de nuevo.

$$y_{ADO}[n] = \frac{1}{2}x_{odd}[n] + n_{odd} + x_{even}[n] + n_{even} + B_{DC} \quad (4.14)$$

Se retiraría el prefijo cíclico y se pasaría de serie a paralelo. Aunque como ya expliqué antes este paso para la simulación de los datos no aporta nada por lo que no se incorporará. Se realizará FFT para así obtener $Y(k)$.

Dado que el sistema se descompuso en dos partes para la recuperación de los datos se deberá realizar con un proceso complejo.

Primero para recuperar la parte impar de la señal Y_{odd} se extraerán los datos impares de $Y(k)$.

Después convertimos de paralelo a serie y dado que llega la señal transmitida dividida por dos respecto a la $x[n]$ tras retirar los ceros en las posiciones pares y la segunda mitad de la señal debido a que es la conjugada de la primera, debemos ecualizar el canal y multiplicar por un factor de 2. Consiguiendo recuperar la señal transmitida con la modificación por ruido.

Para obtener la otra parte de la señal, correspondiente a Y_{even} . Recuperaremos la señal $y[n]$ realizando la IFFT y generaremos la parte de la señal asignada al sistema ACO-OFDM a través de la IFFT de la señal Y_{odd} . Una vez obtenido estas dos señales siento una la señal completa del sistema ACO-OFDM y DCO-OFDM con su respectivo ruido y la otra parte siendo el sistema ACO-OFDM con su respectivo ruido. Se procede a restar la

señal con el sistema ACO-OFDM procedente de y_{odd} quedando solo la señal \bar{y}_{even} . Después, se realiza la FFT de la señal quedando la Y_{even} perteneciente al sistema DCO-OFDM. Con esto se conseguiría un sistema ADO-OFDM completo.

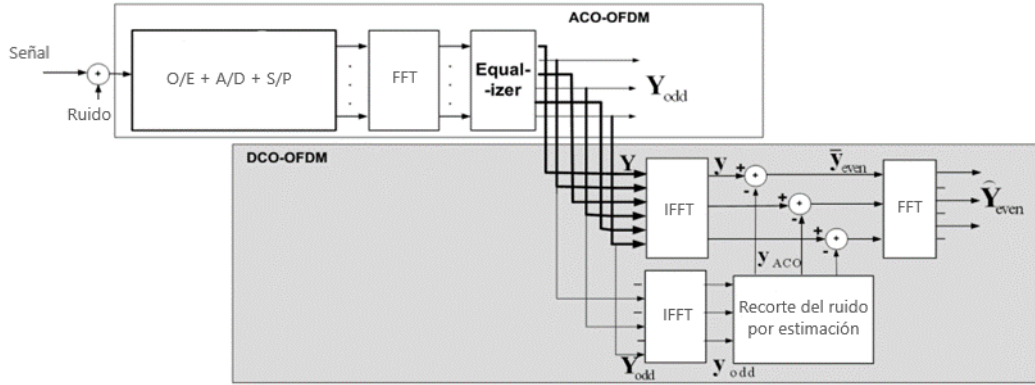


Fig. 4.22: Esquema de receptor ADO-OFDM

4.4.1. MEJORA DEL SISTEMA ADO-OFDM

Mientras se realizaba la búsqueda de los sistemas básicos de O-OFDM se encontró diversos estudios para mejorar el sistema ADO-OFDM [2]. Mostraba cómo optimizar el sistema ADO-OFDM a través de un ajuste de potencia a la hora de transmisión de los sistemas y con un ajuste en la recuperación de los datos.

Para ello, usando el esquema de modulación ADO-OFDM básico le añadimos antes de la transmisión una multiplicación por un factor de potencia a nuestra elección (P).

Quedando:

$$Señal_{ACOnueva} = \frac{Señal_{ACO}}{\sqrt{P_{ACO}}} \sqrt{P_{ACOnueva}} \quad (4.15)$$

$$Señal_{DCOnueva} = \frac{Señal_{DCO}}{\sqrt{P_{DCO}}} \sqrt{P_{DCOnueva}} \quad (4.16)$$

Donde:

$$P_{ACO} = \text{mean}(\text{abs}(ACO^2)) \quad (4.17)$$

$$P_{DCO} = \text{mean}(\text{abs}(DCO^2)) \quad (4.18)$$

$$P_{TOTAL} = P_{ACO} + P_{DCO} \quad (4.19)$$

$$P_{ACOnueva} = P_{TOTAL} P \quad (4.20)$$

$$P_{DCOnueva} = P_{TOTAL} (1 - P) \quad (4.21)$$

Fig. 4.23 muestra cómo se ha programado en LabVIEW ese ajuste de potencia en el sistema ADO-OFDM.

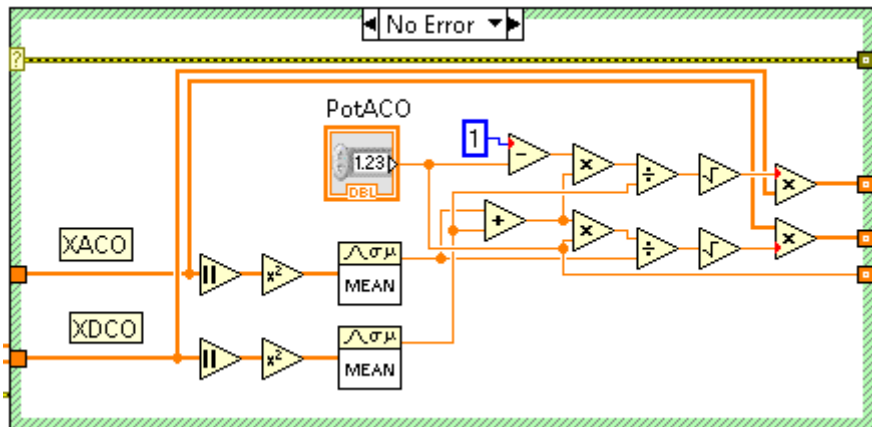


Fig. 4.23: Esquema de ajuste de potencia ADO-OFDM

Consiguiendo distribuir la potencia asignada a cada sistema de transmisión. En el receptor se realiza un cálculo inverso de la potencia inicial transmitida para devolver los valores reales de la señal. Consiguiendo recuperar la señal transmitida y recibida.

4.5. DESARROLLO DE LA APLICACIÓN (.EXE)

Se han creado varios sistemas de modulación que permite emular sistemas Li-Fi mediante la aplicación NI LabVIEW. Esto fue motivado por la búsqueda de una manera de unificar todos estos sistemas y convertirlos en una aplicación que pueda utilizar cualquier persona para simular y estudiar estas modulaciones. Por ello se ha creado un ejecutable para ver cómo cambia la BER en los sistemas de modulación variando el número de subportadoras, de B_{DC} , la potencia, etc.

Para ello, se ha creado un proyecto con el archivo (.vi) generado que contiene la programación de las diferentes modulaciones. Posteriormente, se ha adaptado ese proyecto para crear un archivo ejecutable (.exe). Se le ha dado un icono para su visualización, las carpetas de destino y elementos a editar. Finalmente, creando el archivo (.exe) tenemos el programa preparado para ser ejecutado, permitiéndonos la visualización de las modulaciones en función de la configuración realizada.

Podemos observar los archivos generados al crear este archivo .exe en la Fig. 4.24

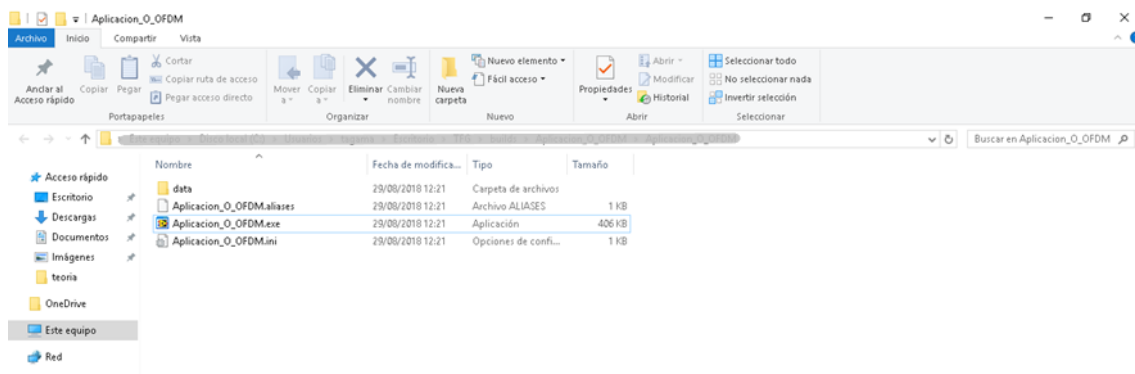


Fig. 4.24: Captura de pantalla del archivo ejecutable

Un ejemplo de la aplicación creada se puede observar en la Fig. 4.25, donde se muestra un ejemplo de configuración de los diferentes esquemas de modulación desarrollados en este trabajo.

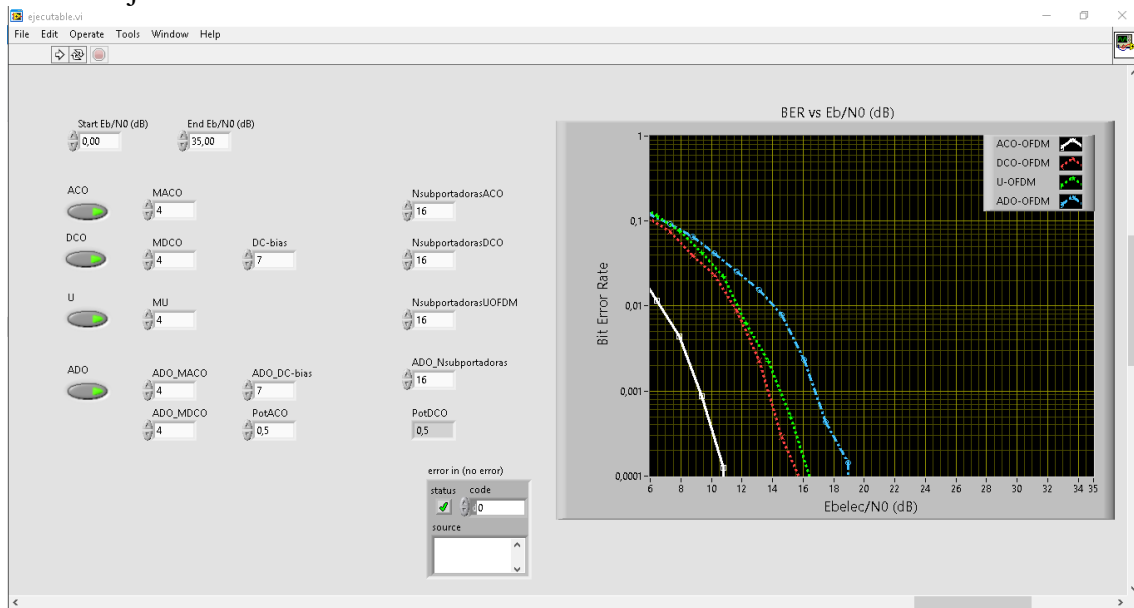


Fig. 4.25: Pantalla frontal del ejecutable con todas las modulaciones

Cambiando algunos valores, podemos observar otras graficas como es la mostrada en la Fig. 4.26, en la que sólo aparecen dos modulaciones con el mismo número de subportadoras y distintos B_{DC}

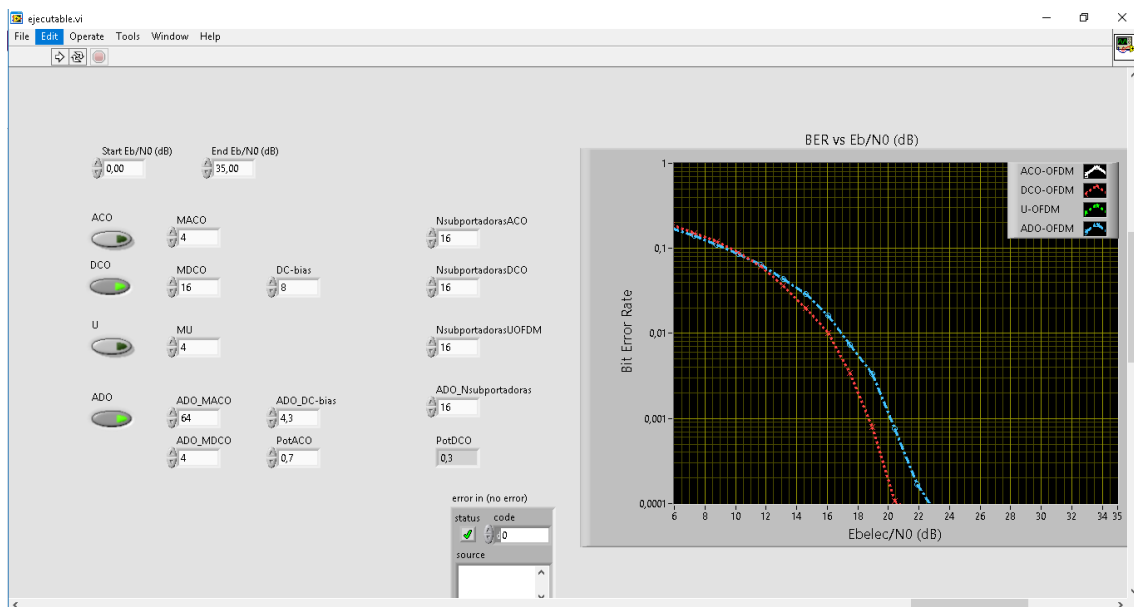


Fig. 4.26: Panel frontal con algunas configuraciones de las modulaciones

4.6. IMPLEMENTACION EN HARDWARE

En este apartado se va a explicar cómo se desarrollaría el sistema para una implementación de hardware basándonos en un proyecto similar a [19], [20], [21].

La implementación en hardware implicará desarrollar no sólo cómo se debe disponer el soporte físico, sino qué adaptaciones hay que hacer con las modulaciones creadas para transmitir la información. Para ello vamos a dividir el problema en dos partes: una la implementación en hardware y la implementación de un sistema en software.

En cuanto a **la implementación del software** debemos conseguir que el sistema cumpla los requisitos del estándar IEEE 802.15.7. Este estándar como ya expliqué previamente definirá la PHY y la MAC.

Lo que se va a realizar es la separación entre transmisor y receptor y eliminación de la adición del ruido AWGN, ya que este será el introducido por el sistema mismo. Después, se deberá añadir los bloques que no se añadieron para la simulación, como es el conversor digital a analógico en el sistema de transmisión y de analógico al digital en sistema de recepción. También hay que añadir el sistema del fotodetector del receptor y el LED del emisor. Y un bloque que añada una cabecera en el receptor y un bloque que la elimine en el receptor. Esto se debe a la necesidad de sincronización y ajustes de los sistemas de comunicación.

En cuanto **el hardware** se necesitará tener dos NI USRP 2920 modificados para funcionamiento con sistemas VLC, uno de ellos funcionará como transmisor y otro como receptor ambos con sus fuentes de alimentación independientes. También necesitaremos dos ordenadores con el software apropiado y conectados a los NI USRP 2920 a través del puerto de ethernet.

El transmisor analógico estará formado por la plataforma NI USRP 2920 con la tarjeta hija LFTX, un bloque para amplificar y el circuito para controlar el LED. Para conseguir enviar la señal se necesitará un subsistema de software que convertirá los datos de digital a analógico (DAC).

El receptor analógico estará formado por la plataforma NI USRP 2920 con la tarjeta hija LFRX, un fotodetector **PDA36A** con amplificador de transimpedancia (*transimpedance amplifier*, TIA).

TABLA 4.1

USRP RF DAUGHTERBOARDS [21]

	Frequency range	Bandwidth
LFTX	0 - 30 MHz	30 MHz
LFRX	0 - 30 MHz	30 MHz
BasicTX	1 - 250 MHz	100 MHz
BasicRX	1 - 250 MHz	100 MHz

TABLA 4.2

Parámetros de PDA36A [22]

Artículos	Longitud de onda	Ancho de banda	Tiempo de subida	Capacidad máxima de respuesta	Potencia equivalente a ruido (NEP) ^a	Área activa	Rango de temperatura de funcionamiento
Fixed Gain							
PDA10A2^b	200 - 1100 nm ^c	DC - 150 MHz	2.3 ns	0.44 A/W @ 730 nm	29.2 pW/Hz ^{1/2}	0.8 mm ² (Ø1 mm)	10 to 50 °C
PDA8A^b	320 - 1000 nm	DC - 50 MHz	7 ns	0.56 A/W @ 820 nm	6.5 pW/Hz ^{1/2}	0.5 mm ² (Ø0.8 mm)	10 to 50 °C
PDF10A	320 - 1100 nm	DC - 20 Hz	22 ms	0.6 A/W @ 960 nm	1.4x10 ⁻³ pW/Hz ^{1/2}	1.2 mm ² (1.1 mm x 1.1 mm)	18 to 28 °C
PDA015A^b	400 - 1000 nm	DC - 380 MHz	1.0 ns	0.47 A/W @ 740 nm	36 pW/Hz ^{1/2}	0.018 mm ² (Ø150 µm)	10 to 40 °C
FPD510-FS-VIS	400 - 1000 nm	DC - 250 MHz	2 ns	-	6.0 pW/Hz ^{1/2}	0.13 mm ² (Ø0.4 mm)	10 to 40 °C
FPD610-FS-VIS	400 - 1000 nm	DC - 600 MHz	1 ns	-	11.2 pW/Hz ^{1/2}	0.13 mm ² (Ø0.4 mm)	10 to 40 °C
Switchable Gain							
PDA100A2^b	320 - 1100 nm	DC - 11 MHz ^d	N/A ^e	0.72 A/W @ 960 nm	2.67 - 71.7 pW/Hz ^{1/2}	75.4 mm ² (Ø9.8 mm)	10 to 40 °C
PDA36A	350 - 1100 nm	DC - 10 MHz ^d	N/A ^e	0.65 A/W @ 970 nm	0.593 - 29.1 pW/Hz ^{1/2}	13 mm ² (3.6 mm x 3.6 mm)	0 to 40 °C
FPD310-FS-VIS	400 - 1000 nm	1 - 1500 MHz	0.5 ns	-	24.0 pW/Hz ^{1/2}	0.13 mm ² (Ø0.4 mm)	10 to 40 °C

5. DIAGRAMA DE GANTT

La Fig. 5.1 muestra un diagrama de Gantt. Esta muestra de forma detallada cómo se ha ido realizando el proyecto mostrando los hitos más importantes y las tareas realizadas en un periodo de tiempo según la planificación y metodología expuestas en la sección 1.4 Planificación y metodología.

Este proyecto está dividido en 5 tareas principales: **Documentación, Implementación de las modulaciones OWC en LabVIEW, Estudio, Conclusiones, Redacción de la memoria.**

Todos ellos dependían en gran parte de los demás de manera que se han realizado de manera continuada una vez obtenidos los hitos necesarios para su ejecución. Sin embargo, la memoria se ha realizado durante todo el periodo del proyecto ya que contiene la información de todas las tareas realizadas.

La tarea de documentación se ha dividido en dos subfases:

- Documentación y estudio en profundidad sobre la tecnología OWC.
- Documentación, estudio, instalación y ejecución del software LabVIEW.

Después se fueron implementando cada una de las modulaciones a desarrollar, todas ellas incluidas en la tarea de Implementación de las modulaciones OWC en LabVIEW.

Después se continuó con un estudio de cada una de las simulaciones y del hardware específico. Acabando con una conclusión que engloba todo lo visto en el proyecto. Todo ello mientras se realizaba la memoria en la que se iba redactando cada uno de los hitos anteriores.

A continuación, se muestra un diagrama de Gantt Fig. 5.1 donde se puede observar el desglose de las tareas llevadas a cabo, y posteriormente Fig.5.2 muestra los hitos que se han ido realizando y con son sus fechas exactas de inicio y final. Para una mejor visualización del diagrama de Gantt véase el Anexo.

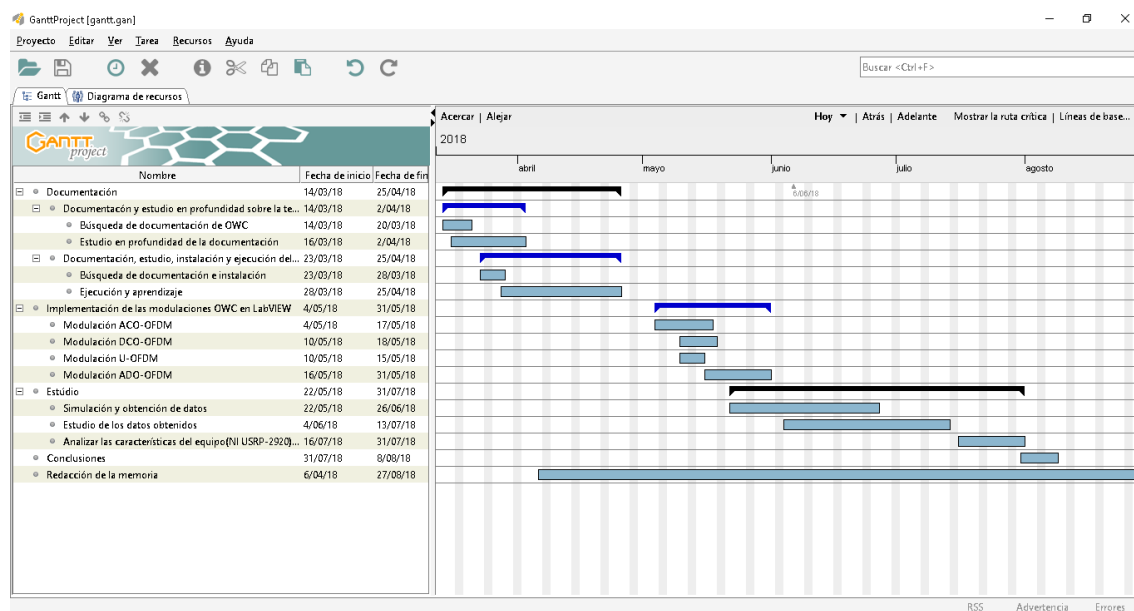


Fig. 5.1: Diagrama de Gantt

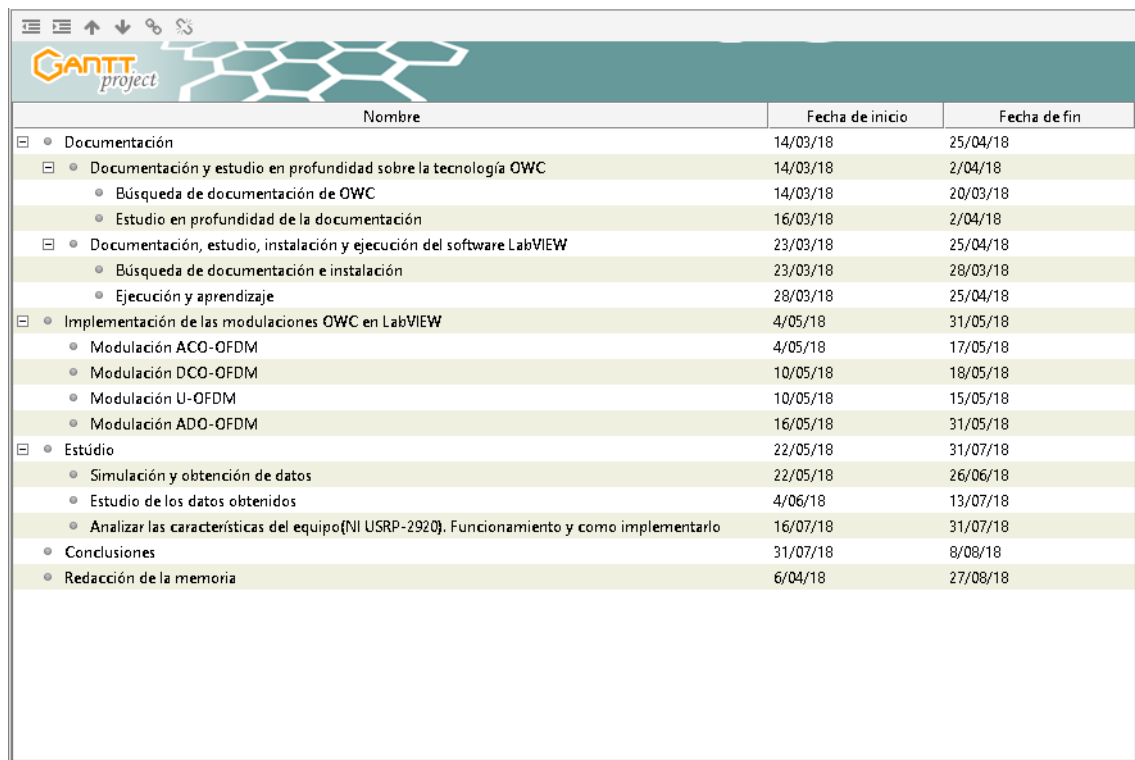


Fig. 5.2: Diagrama de Gannt -tareas fechas de inicio y final

Con todo esto podemos concluir que la duración del proyecto ha sido de 6 meses en los que se ha pasado por distintas fases de trabajo.

6. RESULTADOS

Aparte del simulador (.exe) que se ha generado para evaluar el rendimiento de los diferentes esquemas de modulación O-OFDM, y que ya ha sido presentado, en esta sección se realiza un estudio comparativo de los mismos.

Por tanto, en este apartado se intentan mostrar las ventajas y desventajas de cada esquema de modulación.

6.1. SISTEMAS DCO A DISTINTAS B_{DC}

En este apartado vamos a comparar la tasa de error de bit frente a la relación señal a ruido normalizada, también llamada relación energía por bit/densidad espectral de potencia del ruido. Como se puede observar en la Fig. 6.1, los sistemas DCO-OFDM con un B_{DC} bajo tienen mejor probabilidad de error en relaciones señal a ruido bajas, pero cuando la relación señal a ruido aumenta, el sistema con B_{DC} bajo comete demasiados errores [3]. Esto se debe a que el B_{DC} se añade a la señal para convertirla a unipolar y que esta sólo contenga valores positivos, pero con un bajo valor de B_{DC} no consigues convertir todas las muestras en positivo y al hacer el recorte de esas muestras se pierde demasiada información, aumentando por tanto la tasa de error de bit. Evidentemente, cuanto mayor es el orden de la constelación, menor es la distancia mínima entre símbolos y mayor es la probabilidad de error.

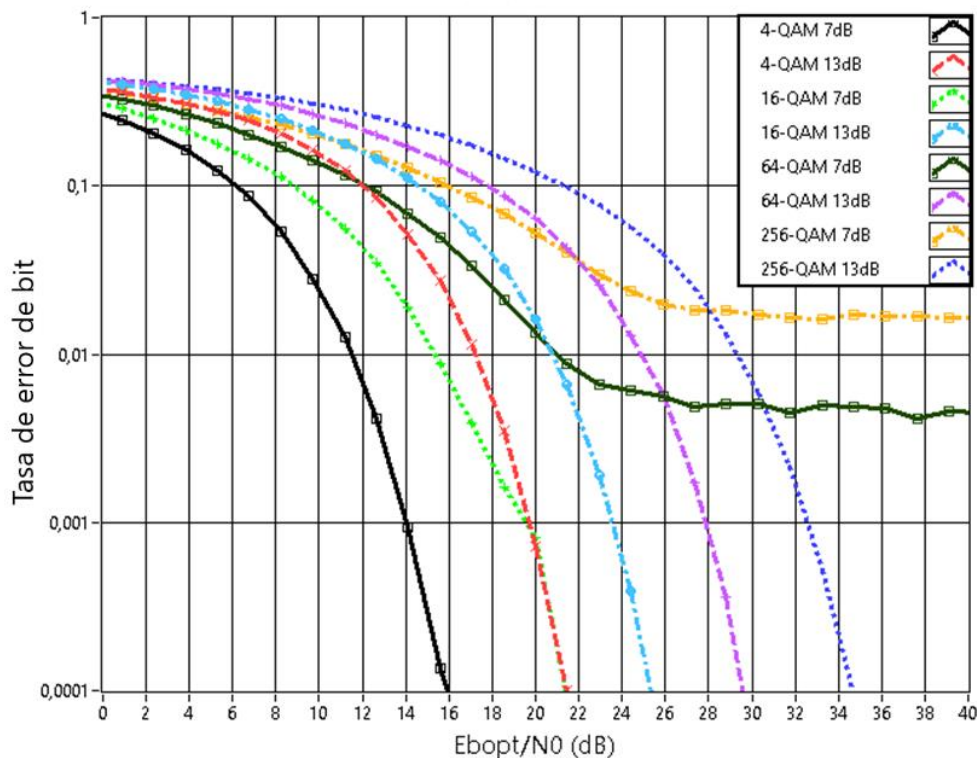


Fig. 6.1: DCO-OFDM con distintas B_{DC}

6.2. SISTEMAS ACO-OFDM, DCO-OFDM

Los sistemas ACO-OFDM a pesar de ser una modulación de VLC como DCO-OFDM, presentan muchas diferencias. Ahora se van a comparar algunas de sus prestaciones como son la eficiencia espectral, BER y la potencia media de transmisión.

Fig. 6.2 presenta una comparación de la relación señal a ruido a distintas tasas de transmisión. Para ello usaremos los datos de las gráficas anteriores cogiendo siempre una probabilidad de error de 10^{-3} . Podemos observar que los sistemas ACO-OFDM pueden alcanzar mayores tasas de bit para una misma E_b/N_0 garantizando una BER de " 10^{-3} ", siempre y cuando se trabajen con valores bajos de tasas de transmisión. Sin embargo, cuando se quieren alcanzar mayores tasas, DCO-OFDM ofrece mejor rendimiento en cuanto a E_b/N_0 , ya que necesita menos símbolos OFDM para transmitir al tener mejor eficiencia espectral. Por tanto, en cuanto a la eficiencia espectral los sistemas ACO-OFDM son menos eficientes que los sistemas DCO-OFDM ya que ACO-OFDM envía información útil en $N/4$ subportadoras por cada símbolo OFDM de N subportadoras, mientras que los sistemas DCO-OFDM envían información útil en $N/2-1$ sobre N subportadoras. La Tabla 6.1 hace una comparación de la potencia eléctrica consumida en la transmisión de ACO-OFDM y DCO-OFDM para $N=16$. Como se puede observar, ACO-OFDM es mucho más eficiente energéticamente ya que DCO-OFDM necesita un valor de continua para transmitir, lo cual aumenta mucho el consumo energético. Sin embargo, si queremos iluminar una estancia a la vez que transmitir información, ese valor de continua es totalmente necesario y no se vería como algo negativo.

$$P_{elec} = E\{x^2\} \quad (6.1)$$

TABLA 6.1

POTENCIA ELECTRICA DE LOS SISTEMAS

Modulaciones/subportadoras	N=16
ACO-OFDM	0.015 W
DCO-OFDM con 7 B _{DC}	0.27 W
DCO-OFDM con 13 B _{DC}	1.09 W

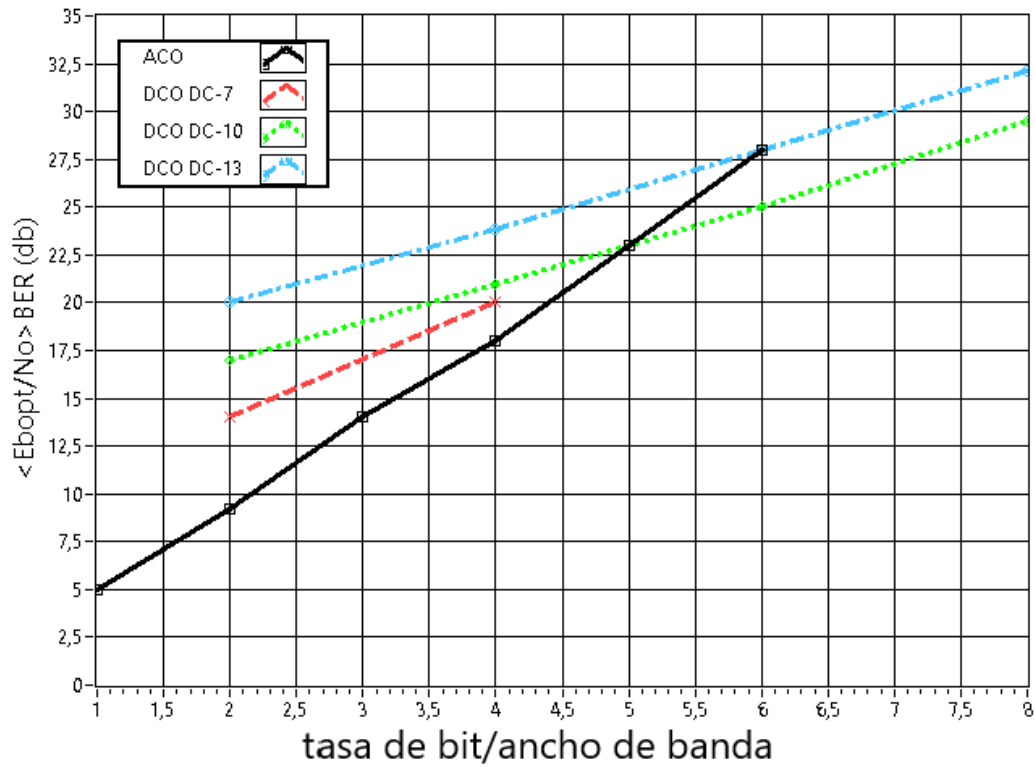


Fig. 6.2: Diagrama de modulaciones a una tasa y relacion señal a ruido

6.2.1. SISTEMAS CON DISTINTAS SUBPORTADORAS

En este apartado se pretende visualizar qué ocurre cuando varías el número de subportadoras en el sistema y con ello decidir si es mejor enviar un volumen de datos mayor o menor.

SISTEMA ACO-OFDM

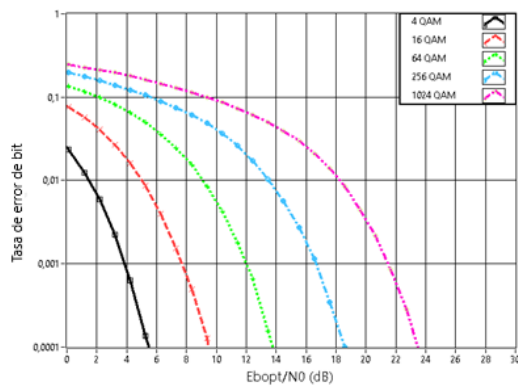


Fig. 6.3: Sistema ACO-OFDM con N=16

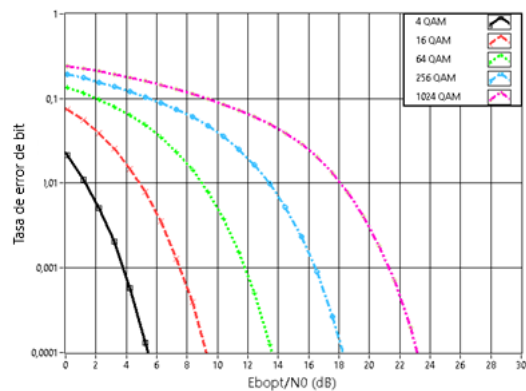


Fig. 6.4: Sistema ACO-OFDM con N=64

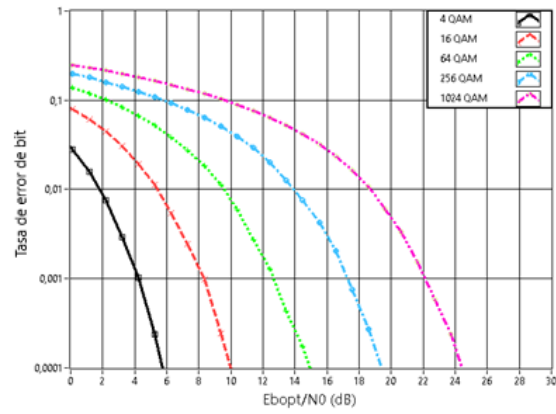


Fig. 6.5: Sistema ACO-OFDM con $N=256$

SISTEMA DCO-OFDM

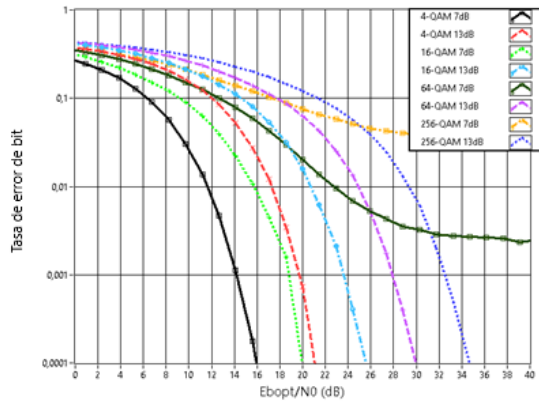


Fig. 6.6: Sistema DCO-OFDM con $N=16$

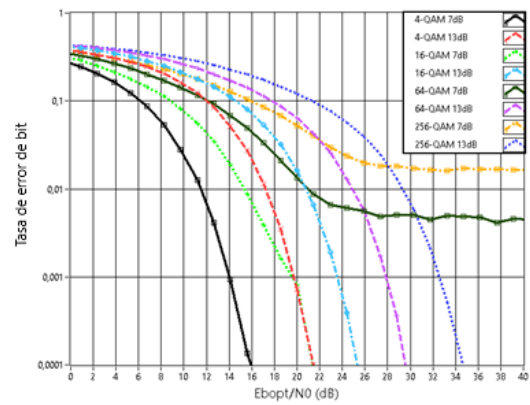


Fig. 6.7: Sistema DCO-OFDM con $N=64$

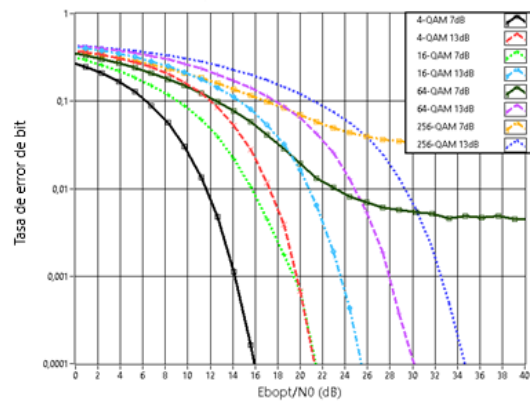


Fig. 6.8: Sistema ACO-OFDM con $N=256$

SISTEMA U-OFDM

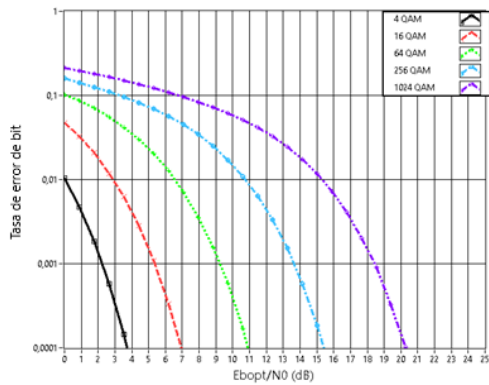


Fig. 6.9: Sistema U-OFDM con N=16

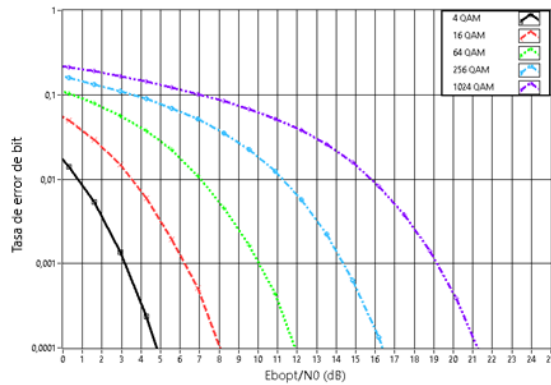


Fig. 6.10: Sistema U-OFDM con N=64

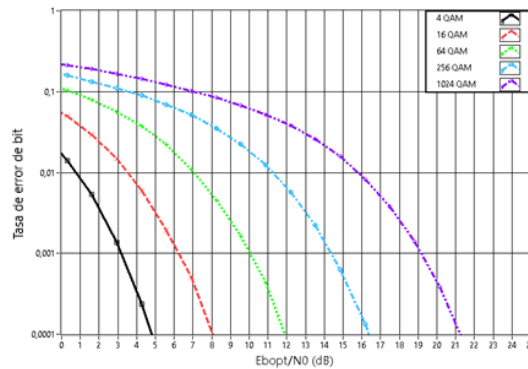


Fig. 6.11: Sistema U-OFDM con N=256

Como se puede observar, independientemente del tipo de modulación que se esté empleando, el número de subportadoras no modifica los resultados en cuanto a tasa de error de bit vs. E_b/N_0 . Por tanto, uno podría pensar que se puede duplicar o triplicar la tasa de transmisión sin ningún coste. Esto en la realidad no es así, ya que introducir un mayor número de subportadoras implica reducir el ancho de banda por cada una de ellas y la capacidad de procesamiento al aumentar el tamaño de las IFFT/FFT debe ser mucho mayor. Además, en un canal real donde existe selectividad en frecuencia debido al multitrayecto y un efecto de filtrado por la función de transferencia del LED y PD, el canal deja de ser exclusivamente AWGN y por tanto se tendría que hacer una distribución de los recursos de una manera más inteligente.

6.2.2. DIFERENCIA ENTRE GRAFICA ELECTRICA Y OPTICA

En los sistemas VLC existe un consumo de potencia eléctrica y óptica, en función de qué se quiera representar. Si nos referimos a energía de bit, en los sistemas ACO-OFDM la diferencia entre la óptica y la eléctrica es:

$$\frac{E_{b,opt,ACO}}{N_0} = \frac{1}{\pi} \frac{E_{belec,ACO}}{N_0} \quad (6.2)$$

Las Fig. 6.12 y Fig. 6.13 representan los resultados E_{belec}/N_0 vs. BER y E_{bopt}/N_0 vs. BER, donde se puede observar que la energía de bit eléctrica es siempre mayor que la energía óptica, cuya relación se encuentra en la ecuación (6.2).

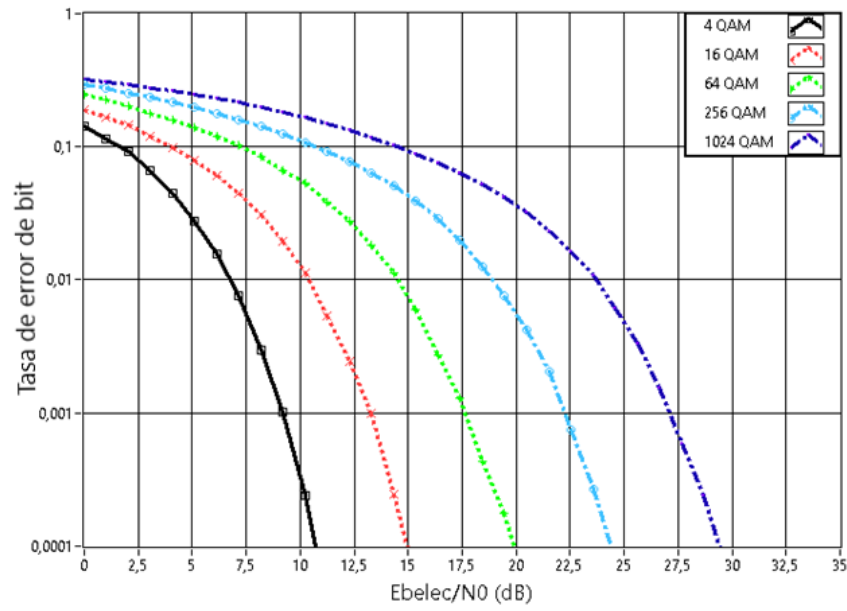


Fig. 6.12: BER vs E_b/N_0 ACO-OFDM óptica

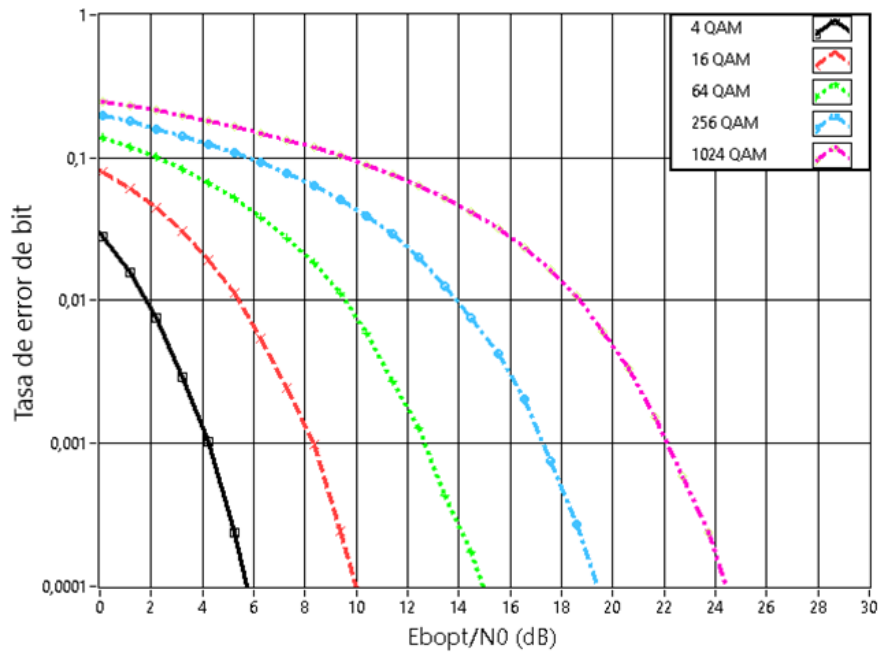


Fig. 6.13: BER vs E_b/N_0 ACO-OFDM eléctrica

En los sistemas DCO-OFDM, la relación entre la energía de bit eléctrica y óptica depende de su valor de continua (B_{DC}) y viene dado por la siguiente ecuación:

$$\frac{E_{bopt,DCO}}{N_0} = \frac{k^2}{1 + k^2} \frac{E_{belec,DCO}}{N_0} \quad (6.3)$$

donde k es dependiente de B_{DC} y viene determinado por la ecuación (4.11) definida en una sección anterior.

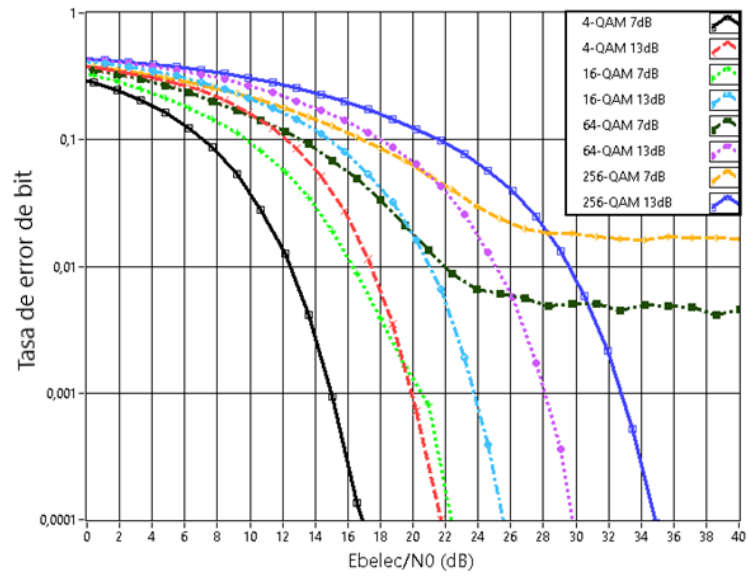


Fig. 6.14: BER vs E_b/N_0 DCO-OFDM eléctrica

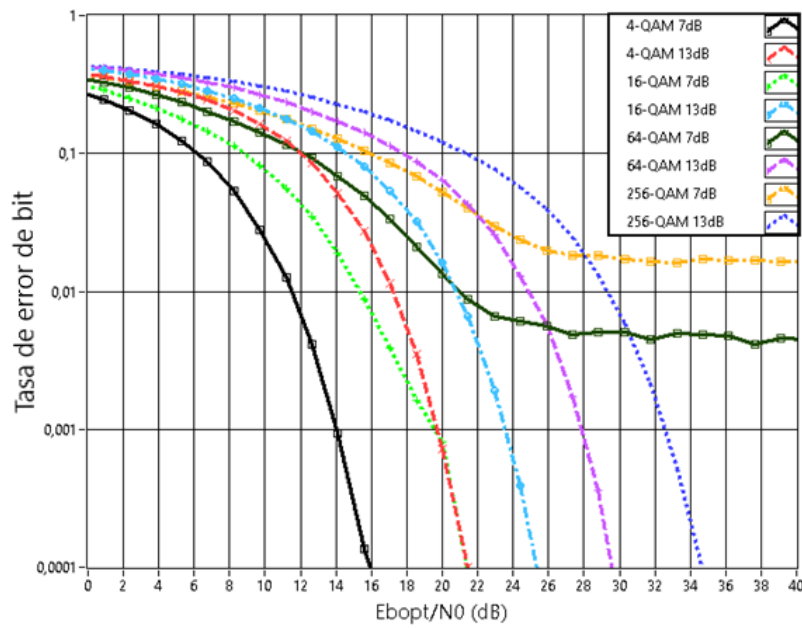


Fig. 6.15: BER vs E_b/N_0 DCO-OFDM óptica

De esta manera podemos observar que a pesar de ser sistemas y graficas proporcionales el desvío para los sistemas ACO-OFDM es constante mientras que para los sistemas DCO-OFDM su variación depende de su valor B_{DC} .

6.3. SISTEMA ADO-OFDM CON DISTINTAS CONFIGURACIONES

El sistema ADO-OFDM es una combinación de ACO-OFDM y DCO-OFDM para obtener unas mejores prestaciones de eficiencia espectral. Como este esquema de modulación implica una complejidad añadida por combinar dos esquemas, se tuvo que usar primero un apoyo en Matlab para posteriormente comparar los resultados con los obtenidos en LabVIEW.

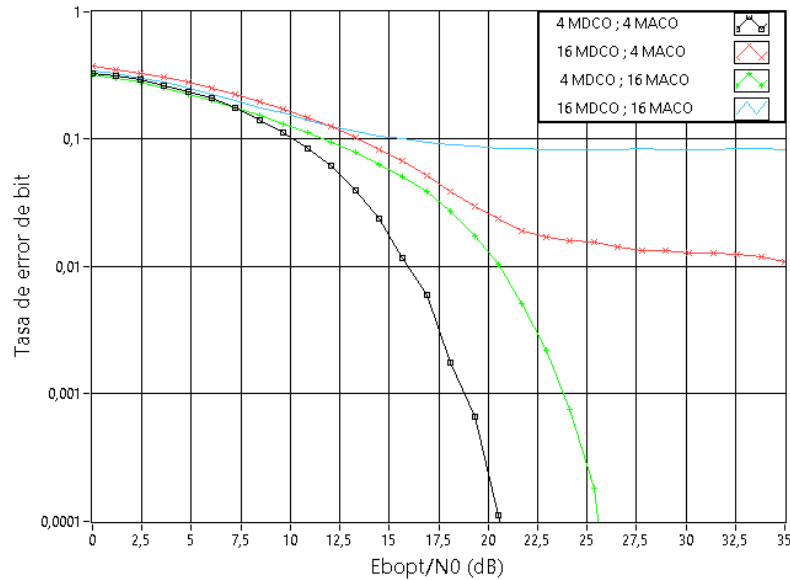


Fig. 6.16: BER vs E_b/N_0 ADO-OFDM con distintas configuraciones y $B_{DC} = 3$ dB

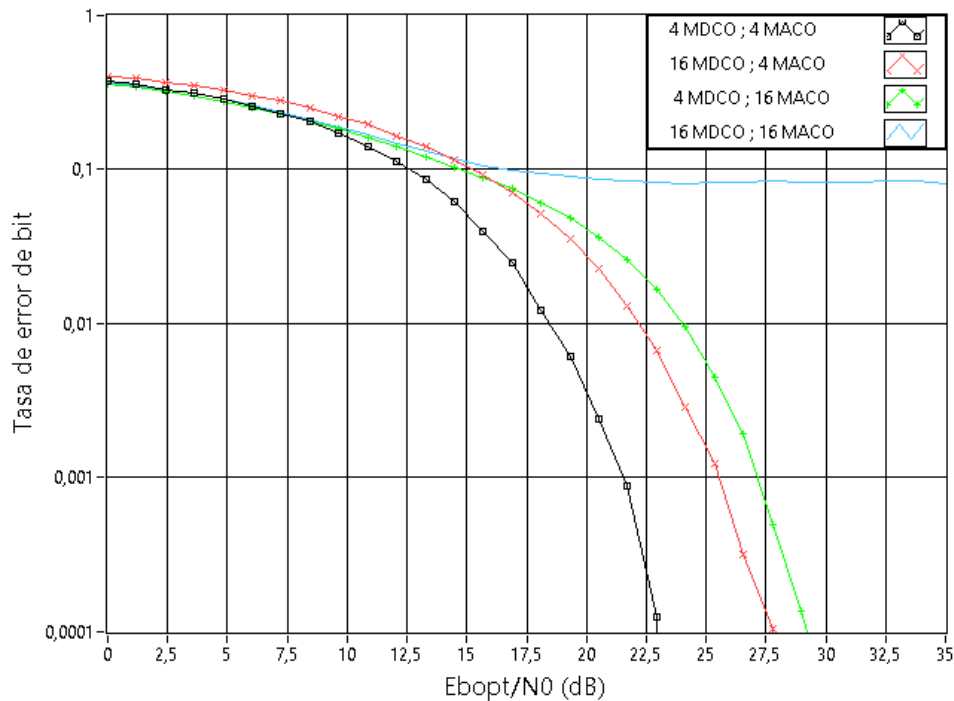


Fig. 6.17: BER vs E_b/N_0 ADO-OFDM con distintas configuraciones y $B_{DC} = 7$ dB

Fig. 6.16 y Fig. 6.17 representan las curvas $E_{b_{opt}}/N_0$ vs. BER para ADO-OFDM cuando el DCO-OFDM y ACO-OFDM que lo componen utilizan diferentes órdenes de

constelación. En la Fig. 6.16 se observa que utilizar una 16-QAM en DCO-OFDM hace aumentar enormemente la BER debido a que el efecto del recorte de las muestras negativas hace perder demasiada información y aumentar la BER. Sin embargo, si aumentamos el valor de B_{DC} de 3dB a 7dB como se observa en la Fig. 6.17, ese recorte de muestras negativas no es tan determinante y no aumenta el BER.

6.4. CONCLUSIONES DE LA COMPARACIÓN DE LOS ESQUEMAS

Los sistemas ACO-OFDM, DCO-OFDM, U-OFDM y ADO-OFDM son todos ellos esquemas de modulación apropiados para VLC. Después de realizar un estudio de todos ellos, programando cada uno de ellos en un entorno SDR y creando un programa .exe para su simulación y comparación, en este trabajo se evalúa el rendimiento de estos esquemas de modulación mediante métricas como la eficiencia espectral, BER y la potencia media de transmisión.

Podemos observar que los sistemas ACO-OFDM pueden alcanzar mayores tasas de bit comparado con los sistemas U-OFDM y DCO-OFDM para una misma E_b/N_0 garantizando una BER de " 10^{-3} ", siempre y cuando se trabajen con valores bajos de tasas de transmisión. Sin embargo, cuando se quieren alcanzar mayores tasas, DCO-OFDM ofrece mejor rendimiento en cuanto a E_b/N_0 , siempre prestando especial atención a la configuración del valor de continua B_{DC} determinante en el consumo energético y en BER. Mientras que a lo que se refiere a la eficiencia espectral podemos observar que los sistemas ACO-OFDM son menos eficientes que los sistemas DCO-OFDM y U-OFDM ya que para los sistemas ACO-OFDM necesitamos $N/4$ portadoras para un bloque de N mientras que para los sistemas DCO-OFDM y U-OFDM se necesitan $N/2$ o más concretamente $N/2-1$ ya que hay que añadir un cero en las posiciones primera e intermedia. Y el sistema ADO-OFDM, al ser una combinación de ACO-OFDM y DCO-OFDM, presenta una eficiencia espectral entre ellas.

7. PRESUPUESTO

En este apartado se realiza y desglosa el proyecto para ver los costes.

Primero se calcula el número total de horas empleadas para la realización de este proyecto, con lo que se obtendrá el coste del personal. Se realiza a partir de la planificación que ya se explicó en una sección anterior.

Tabla 7.1

TIEMPO DE TRABAJO CON SOLAPAMIENTO

FASE	SUBFASE	TIEMPO EMPLEADO (días)
1. Documentación y estudio en profundidad sobre la tecnología OWC	I.Búsqueda de documentación de OWC	5
	II.Estudio en profundidad de la documentación	12
2. Documentación, estudio, instalación y ejecución del software LabVIEW	I.Búsqueda de documentación e instalación	4
	II.Ejecución y aprendizaje	21
3. Implementación de las modulaciones OWC en LabVIEW	I.Modulación ACO-OFDM	10
	II.Modulación DCO-OFDM	7
	III.Modulación U-OFDM	4
	IV.Modulación ADO-OFDM	12
4. Simulación y obtención de datos		26
5. Estudio de los datos obtenidos		30
6. Analizar las características del equipo (NI USRP-2920) para determinar su funcionamiento y como implementarlo		12
7. Conclusiones		7
8. Redacción de la memoria		70
TOTAL		220

Dado que esta tabla no tiene en cuenta la realización de las tareas en paralelo, a continuación, se incluye una tabla con el cómputo de horas y días trabajados reales. Esta tabla tiene en cuenta un trabajo diario de tres horas de manera que al cabo del mes las

horas extras han sido añadidas como más días. Por lo que, a pesar de estar diseñado para trabajar sólo de lunes a viernes, este sistema también incluye el trabajo llevado a cabo los fines de semana.

Tabla 7.2

TIEMPO DE TRABAJO SIN SOLAPAMIENTO

MES	DIAS	HORAS DIARIAS	HORAS TRABAJADAS
MARZO	13	3	39
ABRIL	22		66
MAYO	25		75
JUNIO	21		63
JULIO	21		63
AGOSTO	26		78
TOTAL			384

Para calcular el tiempo que se ha empleado para la realización de este trabajo se ha tenido que dividir las horas trabajadas en dos categorías: una de ellas realizada por el Tutor- jefe del Proyecto y la otra las horas realizadas por el graduado.

Tabla 7.3

COSTE DE PERSONAL

CATEGORIA	TIEMPO (h)	PRECIO/HORA (€/h)	IMPORTE (€)
Jefe del proyecto	78	35	2730
Graduado	384	15	5760
TOTAL			8590

El precio del coste del material se hará mediante una estimación entre la degradación del precio del material, el tiempo de uso y su precio.

$$COSTE = \frac{TU \times imp}{PD} \quad (7.1)$$

Donde:

TU - tiempo de uso

Imp - importe del componente

PD - precio de depreciación

Tabla 7.4

COSTE DEL MATERIAL

Componentes	Tiempo de uso (meses)	Período de depreciación (meses)	Importe de componente (€)	COSTE (€)
PC de trabajo más accesorios	6	32	1150	215.63
PC de recepción más accesorios	2	32	1150	35.94
LabVIEW 2 PC	6	24	11494	2873.50
NI URP 2910, cableado, emisor	2	65	3372	103.75
NI URP 2910, cableado, Receptor	2	65	3420	105.23
Tarjeta hija TX, RX [23], cable adaptado	2	20	230	23.00
TOTAL				3357.05

Tabla 7.5

COSTE TOTAL

CONCEPTO	COSTE (€)
Coste de Personal	8590.00
Coste de Materiales	3357.05
Costes indirectos (20%)	2389.41
Subtotal	14336.46
IVA (21%)	12618.14
TOTAL	26954.60

El coste del proyecto asciende a un total de veintiséis mil novecientos cincuenta y cuatro euros con sesenta céntimos.

8. CONCLUSION Y FUTURAS LINEAS DE TRABAJO

Para concluir se resume el trabajo realizado, las conclusiones obtenidas para dar un resumen del proyecto y continúa con unas futuras líneas de estudio.

8.1. CONCLUSION

Este trabajo de Fin de Grado busca estudiar las modulaciones de OFDM en sistemas de comunicación óptica inalámbrica en un nuevo entorno de trabajo, que permitirá su uso y el desarrollo óptimo para una futura implementación en hardware.

Para ello se muestra cómo fue el proceso de documentación, cuál es el estado actual de esta tecnología e implementa esos sistemas de modulación en ese nuevo entorno. Los datos que se obtuvieron mostraban cómo afectaba el ruido a estas modulaciones y qué ventajas e inconvenientes aportaban cada una de ellas. A pesar de ser un sistema de programación visual enfocado al sistema de RF tradicional con la modulación OFDM, se consiguió programar y adaptarlo para un uso en sistemas por luz. Para ello se tuvo que superar los problemas del hardware que aportaba el dispositivo NI USRP modificando sus componentes.

Como conclusión, este proyecto ha permitido no solo el estudio de la modulación OFDM para sistemas de luz, sino también la capacidad para implementarlo en una aplicación como LabVIEW y su implementación en hardware. Además, este TFG también ha permitido al estudiante visualizar los pasos a realizar cuando se desarrolla un proyecto y las dificultades que proyecto presenta en cada uno de los hitos.

8.2. FUTURAS LINEAS DE TRABAJO

Esta tecnología está comenzando a implementarse. Aun así, esta tecnología aporta una gran mejora competitiva con respecto a los sistemas de comunicación inalámbrica predecesores, consiguiendo mejoras de privacidad, velocidad, reutilización de frecuencias, etc.

Por ello partiendo de este Trabajo de Fin de Grado podemos no sólo observar las ventajas de esta tecnología, sino que nos permite realizar muchas investigaciones futuras para su mejor desarrollo como:

- El estudio de nuevos esquemas de modulación, partiendo de los aquí expuestos. De esta manera se podrán estudiar algunas de sus características como son su eficiencia energética, su eficiencia espectral, la tasa de error de bit, etc.
- Optimizar los esquemas de modulación aquí propuestos, combinando algunas de sus características como son el orden de la constelación, el nivel de B_{DC} o el número de subportadoras. En el caso de ADO-OFDM, se podrá estudiar cómo combinar los parámetros del DCO-OFDM y ACO-OFDM que lo componen, así como la asignación de potencias a uno u otro.
- Estudio de cómo afectaría introducir estimadores, codificadores y sincronización en el sistema.
- La implementación del sistema en hardware de modo real, viendo cómo afectan la obstrucción de la línea de visión directa y las reflexiones. Se esta manera se

puede determinar la precisión del simulador comparándolo con los resultados reales obtenidos.

Finalmente, se puede elaborar un sistema más complejo utilizando múltiples transmisores. Así construiríamos un sistema *Multiple-Input and Single-Output* (MISO) que permitiría reducir la probabilidad de bloqueo de la línea de visión directa.

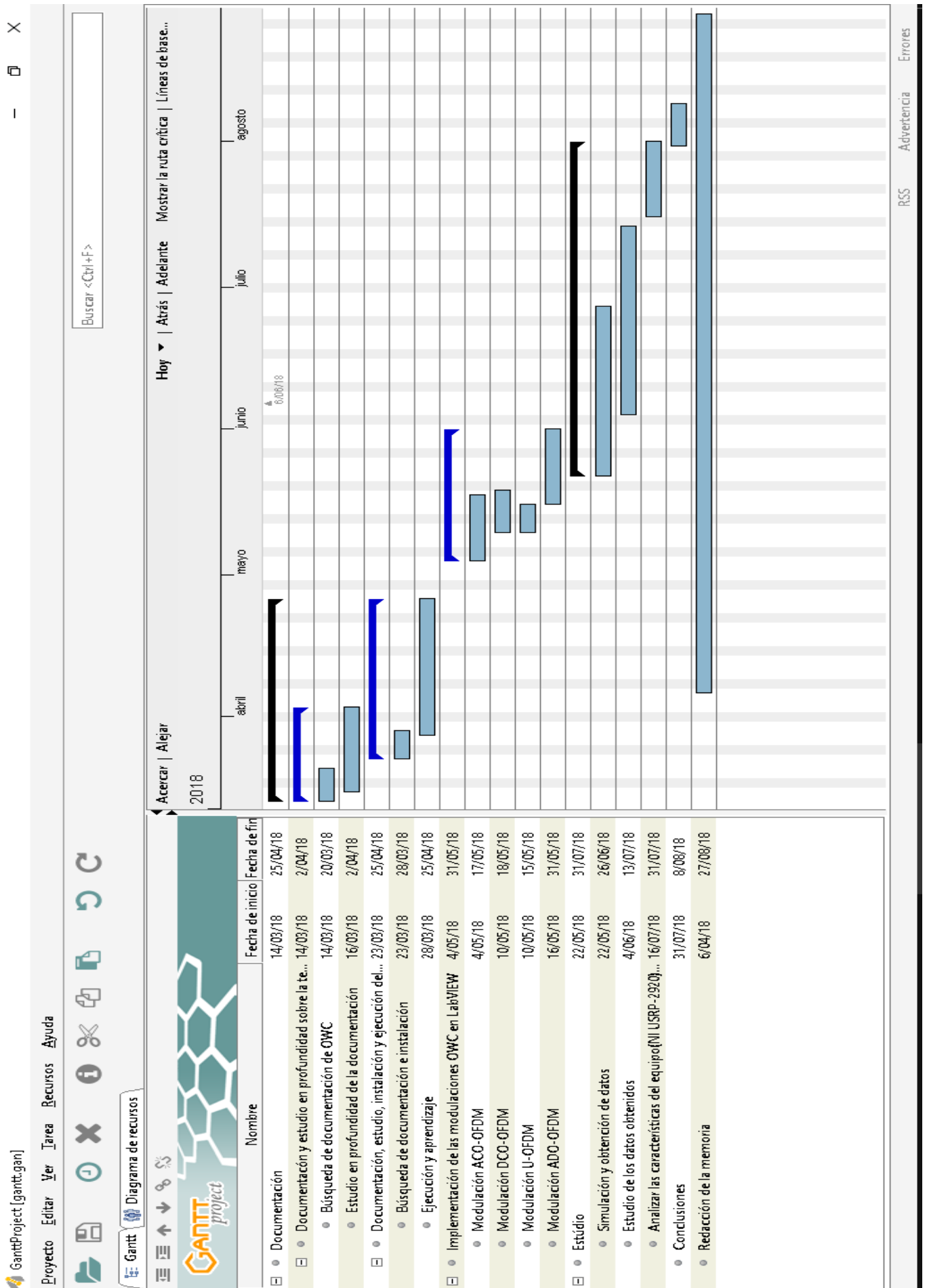
REFERENCIAS

- [1] «uc3m,» [En línea]. Disponible en: <http://uc3m.libguides.com/TFG/escribir>. [Último acceso: 17 09 2018].
- [2] S. D. Dissanayake y J. Armstrong, «Comparison of ACO-OFDM, DCO-OFDM and ADO-OFDM in IM/DD Systems,» *JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY*, vol. 31, nº 7, p. 10, 2013.
- [3] J. Armstrong y B. J. C. Schmidt, «Comparison of Asymmetrically Clipped Optical OFDM and DC-Biased Optical OFDM in AWGN,» *IEEE COMMUNICATIONS LETTERS*, vol. 12, nº 5, p. 3, 2008.
- [4] IEEE Standards Association, «standard 802_15_7,» [En línea]. Disponible en: https://standards.ieee.org/standard/802_15_7-2011.html. [Último acceso: 22 09 2018].
- [5] IEEE Standards Association, «Internet of Things,» [En línea]. Disponible en: <https://standards.ieee.org/initiatives/iot/stds.html>. [Último acceso: 22 09 2018].
- [6] «CDR-Center for Devices and Radiological Health,» [En línea]. Disponible en: <https://www.fda.gov/default.htm>. [Último acceso: 17 09 2018].
- [7] «cenelec,» [En línea]. Disponible en: <https://www.cenelec.eu/>. [Último acceso: 17 09 2018].
- [8] «IEC-International Electrotechnical Commission,» [En línea]. Disponible en: <http://www.iec.ch/>. [Último acceso: 17 09 2018].
- [9] «ANSI- American National Standards Institute,» [En línea]. Disponible en: <https://www.ansi.org/>. [Último acceso: 17 09 2018].
- [10] IEEE Standards Association, «IEEE 802.15 WPAN,» [En línea]. Disponible en: <http://www.ieee802.org/15/pub/TG1.html>. [Último acceso: 22 09 2018].
- [11] IEEE Standards Association, «IEEE 802.11 TM REDES DE ÁREA LOCAL INALÁMBRICA,» [En línea]. Disponible en: <http://www.ieee802.org/11/>. [Último acceso: 17 09 2018].
- [12] OLEDCOMM,«América LiFi,» [En línea]. Disponible en: <http://www.americalifi.com/wp/>. [Último acceso: 19 09 2018].
- [13] Shenzhen Twinkle Opto Electronics Co.,«TKLED,» [En línea]. Disponible en: <http://www.tkled.com/>. [Último acceso: 17 09 2018].
- [14] «Spm Lighting Co.,» [En línea]. Disponible en: <http://www.spmlighting.com/>. [Último acceso: 17 09 2018].
- [15] «Hangzhou Frankever Electronic Co.,» [En línea]. Disponible en: <http://www.frankever.com/>. [Último acceso: 17 09 2018].
- [16] LabVIEW ,«LabVIEW,» [En línea]. Disponible en: <http://www.ni.com/>. [Último acceso: 17 09 18].

- [17] National Instruments Brand, «Ettus Research,» [En línea]. Disponible en: <https://www.ettus.com/product/details/UN210-KIT>. [Último acceso: 22 09 2018].
- [18] M. S. I. a. H. Haas, «Modulation Techniques for Li-Fi,» vol. 14, ZTE COMMUNICATIONS, 2016. [En línea]. Disponible en: <http://www.zte.com.cn/endata/magazine/ztecommunications/2016/2/articles/201605/P020160512435234985272.pdf> [Último acceso: 22 09 2018].
- [19] J. Baranda, P. Henarejos y C. G. Gavrinca, «An SDR Implementation of a Visible Light Communication System Based on the IEEE 802.15.7 Standard,» Universidad de Cornell ,Barcelona (Spain) , [En línea]. Disponible en: <https://arxiv.org/pdf/1803.07337.pdf>[Último acceso: 22 09 2018].
- [20] Paul Fergusson, "*Light Fidelity (Li-Fi) Prototype with Raspberry Pi*" [En línea]. Disponible en: https://eprints.usq.edu.au/31404/1/Fergusson_P_Kist.pdf. [Último acceso: 22 09 2018]
- [21] P. Kamsula y M. Katz, "*DESIGN AND IMPLEMENTATION OF A BIDIRECTIONAL*", 2015. [En línea]. Disponible en:<http://jultika.oulu.fi/files/nbnfioulu-201502141097.pdf> [Último acceso: 22 09 2018].
- [22] Thorlabs, «PDA36A, » [En línea]. Disponible en: <https://www.thorlabs.com/catalogpages/obsolete/2018/PDA36A.pdf> [Último acceso: 22 09 2018].
- [23] «ettus,» National Instruments, [En línea]. Disponible en: <https://www.ettus.com/product/details/LFRX>. [Último acceso: 22 09 2018].

ANEXOS

Diagrama de Gantt



RESUMEN EN INGLES

The project tries to perform an implementation of Optical Orthogonal Frequency Division Multiplexing (O-OFDM) modulations in a specific software-defined radio (SDR) called NI LabVIEW, for comparison and in most of the options.

INTRODUCTION

The advancement of technology linked to the need to interconnect our devices for greater comfort has led to making communication systems essential.

Most of the technologies we use today use radio frequency because it allows us to communicate comfortably and, sometimes, reaching high transmission rates.

It must be said that lately there is a problem of saturation of the radioelectric spectrum, due to the high demand on the part of the users of wireless communications. This leads the scientific community to look for new alternatives capable of guaranteeing these requirements. Optical wireless communications appear as one of the alternatives that provide advantages such as: security, increased transmission rates, cost savings, use of communications in environments where radio frequency (RF) can't be used, etc.

The objective of the VLC technology is to provide a communication alternative to RF systems to increase the speed and the devices to be connected. While my goal in this Final Degree Project TFG is to study the modulations of this technology, implement them and evaluate them for future use through the NI LabVIEW application and its appropriate hardware.

The aspects on which this project will focus are:

- The study of the different OFDM modulation schemes for wireless optical communications.
- Development of these modulations on an SDR platform.
- Comparison of the different O-OFDM schemes.
- Implementation of a program that can execute the different schemes proposed, with their characteristics.
- The description of the development of a prototype capable of transmitting using the different modulation schemes proposed.

The realization of this project has focused on 5 fundamental aspects.

- Compilation and study of documentation of both the OWC systems and the application and LabVIEW software.
- Development of the modulations to be studied.
- Compilation of results and evaluation of these.
- Extraction of conclusions from the results and evaluation of the TFG.

- Redaction of the memory allowing to consolidate the knowledge that was acquired in the realization of the TFG when having to write them on paper.

STATE OF ART

The VLC technology is still under development, so its regulation is less strict. Even so, there are several organisms that have overseen its regulation and to lay the foundations for its development.

The current Standard is IEEE 802.15.7 A PHY layer and a MAC layer are defined for short-range optical wireless communications using visible light in optically transparent media. This standard seeks to deliver data rates high enough to support audio and video multimedia services while providing the mobility of the visible link. Despite this, this technology working on the wrong thresholds can damage living beings, whether they are damage to the retina more related to wavelengths close to blue, or to skin more related to wavelengths close to the Red color.

This has led to various organizations and agencies trying to implement necessary regulations to ensure eye safety. These regulations are developed by: **CDRH** [6], **CENELEC** [7], **IEC** [8], **ANSI** [9].

Among RF systems at low frequencies are:

Bluetooth: works in the free 2.4 GHz band and reaches speeds of 2 Mbps.

Wi-Fi: in the band of 5-7Ghz with speeds of theoretical 54Mbps in which on average they don't exceed real 22Mbps. Allowing a great coverage between rooms and that despite the obstacles an optimal service is maintained, although it doesn't allow large distances to transmitter.

In systems at high frequencies, direct vision is more sought after and considerable speed changes occur and aren't allowed to transmit at great distances.

The optical wireless communications (OWC) use a broad free spectrum at 700-10000nm, which allows this technology, speeds up to 42-8Gbps and distances of up to 5km through infrared. As for the disadvantages, it can't go beyond obstacles and at present the installation price of this technology is very high.

Although unlike RF, the insulation produced by not trespassing obstacles allows them to reuse their entire spectrum, achieving bandwidth much greater than RF. In addition, this technology has applications such as [5]:

GEOLiFi- It allows to locate the position of the users through the light.

LiFi ONEWAY- Transmits information securely to customers.

Li-Fi DUPLEX- System that allows you to connect to the internet at high speed

This makes OWC systems a perfect alternative for the growth of demand for wireless communication systems with higher speeds.

These modulations in communication systems through light provide high rates of transmission, although with single-carrier techniques and InterSymbolic Interference (ISI). Therefore, this project considers the OFDM modulation, which is a multi-carrier

technique to improve these communications. For the operation of these systems you need an LED that will act as a transmitter and a photodiode that will act as a receiver.

VLC provides:

Better control of interference (light doesn't go through walls).

It is a harmless technology that is not harmful to human beings if they don't exceed the allowed levels of illumination.

There is no interference with RF when using other bands (in this way heterogeneous networks can be generated where spectral efficiency is increased).

Free-use frequency bands without the need for a license to use them.

Low cost since they are manufactured with devices that are available to everyone.

Some application areas where this technology provides advantages are: mining, power plants, museums, hospitals, shopping centres, etc.

This has allowed that several companies have begun to develop this technology such as: Shenzhen Twinkle Opto-Electronic Co., Spm Lighting Co., Hangzhou Frankever Electronic Co.

SYSTEM DESIGN

The system has a part of the software that is carried out through NI LabVIEW, and a part of the hardware, which is carried out with the NI USRP.

LabVIEW is an engineering software. It works on all platforms whether Windows, UNIX, MAC and GNU / Linux. It has advantages such as:

- Increase in speed thanks to the graphic compiler of this system.
- The possibility of implementing written applications of other languages.
- This tool also has large libraries that allow you to acquire and analyze the generated data.
- Allows easy handling in the interface with external elements and mainly with their own.
- It facilitates the development of applications since it is an easy and intuitive tool.

While the software defined radio device, NI USRP [9] is a radio communication system that uses the software to implement necessary algorithms in a digital communication.

DEVELOPMENT

This section aims to show how the chosen O-OFDM modulations work, and how they have been implemented through the LabVIEW tool.

The systems studied are:

Asymmetrically Clipped OFDM (ACO-OFDM): Collect the data bits to be transmitted and divide it into blocks of $N/4$ OFDM symbols with M-QAM modulation. To do this, it is introduced in a LabVIEW block that converts the input data into output data according to the chosen constellation order. Then it is distributed in a Hermitian matrix, conjugating the data and adding them inversely with zeros in the even positions, leaving a size of (N) . After the IFFT it is possible to pass the signal of the frequency domain to the temporal one. A cut is made that consists of eliminating the negative values and converting them to zero. It doesn't imply a loss of useful information since the time symbols of ACO-OFDM systems have a symmetry whereby each positive value corresponds to a negative value of equal amplitude.

It works with an AWGN channel, that is, the noise that is added to the transmitted signal is white, auditory and Gaussian. In the receiver, the FFT is performed, leaving the transmitted signal divided by two. After removing the zeros in the even positions and the second half of the signal because it is the conjugate of the first, we must equalize the channel and multiply by a factor of 2. Getting to recover the signal transmitted with the modification by noise.

Unipolar OFDM (U-OFDM): Collect the data bits to be transmitted and divide it into blocks of $N/2-1$ OFDM symbols with M-QAM modulation. To do this, it is introduced in a LabVIEW block that converts the input data into output data according to the chosen constellation order. Then it is distributed in a Hermitian matrix, conjugating the data and adding them inversely with zeros in the first and last positions, leaving a size of (N) . After the IFFT it is possible to pass the signal of the frequency domain to the temporal one. A change is made from a bipolar to a unipolar system. It consists of leaving the positive values in the first vector and the negative values changed significantly in the second.

It works with an AWGN channel, that is, the noise that is added to the transmitted signal is white, auditory and Gaussian. In the receiver, the received signal is recomposed by joining the first vector with the second one changed sign. The FFT is performed, leaving the transmitted signal plus the noise. After removing the zeros in the first and intermediate positions and the second half of the signal because it is the conjugate of the first, we must equalize the channel. Getting to recover the signal transmitted with the modification by noise.

DC-biased Optical OFDM (DCO-OFDM): Collect the data bits to be transmitted and divide it into blocks of $N/2-1$ OFDM symbols with M-QAM modulation. To do this, it is introduced in a LabVIEW block that converts the input data into output data according to the chosen constellation order. Then it is distributed in a Hermitian matrix, conjugating the data and adding them inversely with zeros in the first and last positions, leaving a size of (N) . After the IFFT it is possible to pass the signal of the frequency

domain to the temporal one. A transformation to positive values is made by adding a BDC, but if the values are very small, a negative part can remain, so a negative part is cut.

It works with an AWGN channel, that is, the noise that is added to the transmitted signal is white, additive and Gaussian. In the receiver, the FFT is performed, leaving the transmitted signal plus the noise. After removing the zeros in the first and intermediate positions and the second half of the signal because it is the conjugate of the first, we must equalize the channel. Getting to recover the signal transmitted with the modification by noise.

Asymmetrically Clipped DC biased optical OFDM (ADO-OFDM): it is a system that combines ACO-OFDM and DCO-OFDM system characteristics. To do this, the signal is broken down into odd and even data that will be assigned to the ACO-OFDM system, the even and the odd part to DCO-OFDM. Then the AWGN noise will be added, since we consider an AWGN channel for the evaluation of the modulation techniques. In the receiver the FFT is carried out, leaving the transmitted signal plus the noise. Removing the odd part of the signal we will have the values to obtain the part belonging to ACO-OFDM. While to obtain the data from the DCO-OFDM part, the IFFT is performed. The signal is taken and removing the ACO-OFDM part, the DCO-OFDM values are obtained after performing the FFT.

These modulations have been programmed to perform a comparative study between the different O-OFDM modulations.

Once programmed, an executable is created that allows executing it on any device. That way, anyone can make use of this program and evaluate the performance of these modulations.

A design is also proposed to implement the O-OFDM communication programmed here using hardware. The implementation in hardware involves developing not only the physical support, but also what adaptations must be made with the modulations created to transmit the information. To do this we will divide the problem into two parts: the implementation in hardware and the implementation of the system in software.

Regarding the implementation of software, we must ensure that the system meets the requirements of the IEEE 802.15.7 standard. This standard, as I explained previously, will define the PHY and the MAC.

As for the hardware, it will be necessary to have two NI USRP 2920 adapted for operation with VLC systems.

Results

This section shows a comparison of the systems already shown comparing the advantages and disadvantages of the benefits in each one of them.

The ACO-OFDM, DCO-OFDM, U-OFDM and ADO-OFDM systems are very different. In this work, the performance of these modulation schemes is evaluated through metrics such as spectral efficiency, BER and average transmission power. We can see that ACO-OFDM systems provide a better signal to noise ratio compared to U-OFDM, DCO-OFDM to different BDCs and different ADO-OFDM systems, which is a combination of ACO-OFDM and DCO for the same error probability. In terms of spectral efficiency, we can see that the ACO-OFDM systems are less efficient than the

DCO-OFDM and U-OFDM systems, since only 4 useful symbols on N subcarriers are transmitted in ACO-OFDM, while DCO-OFDM and U-OFDM transmit $N/2 - 1$ symbols on an OFDM symbol of N subcarriers. The ADO-OFDM system, being a combination of ACO-OFDM and DCO-OFDM, has a spectral efficiency between them.

Budget

In this section the project is made and broken down to see the costs.

First, the total number of hours used to carry out this project considered in the planning of the project is calculated. With this you will get the cost of the staff. For this, it considers a daily work of three hours so that at the end of the month the extra hours have been added as more days. So, despite being designed to work only from Monday to Friday this system includes that we have also worked on the project weekends. To calculate the time that has been used to carry out this work, the hours worked have been divided into two categories, one of them carried out by the Tutor-head of the Project and the other the hours carried out by the graduate. Then the cost of the material is calculated according to the price and the degradation of the material. The total cost of the project is twenty-six thousand nine hundred fifty-four euros and sixty cents.

Conclusion and future lines of study

To conclude, the work carried out, the conclusions obtained from the project are summarized and it continues with some future lines of study applicable to this project. The data that was obtained showed how the noise affected these modulations and what advantages and disadvantages each one contributed. Despite being a visual programming system focused on the traditional RF system with OFDM modulation, it was possible to program and adapt it for use in light systems. For this, the hardware problems that the NI USRP device had to modify its components had to be overcome. In conclusion, this project has allowed not only the study of OFDM modulation for light systems, but also the ability to implement it in an SDR platform. In addition, it has allowed the student to visualize the steps to take when a project is developed and the difficulties that a project presents in each of the milestones. This technology is beginning to be implemented. Even so, this technology provides a great competitive improvement with respect to the predecessor wireless communication systems, achieving enhanced privacy and speed of data transmission, among other advantages. Therefore, starting from this End of Degree Work we can't only observe the advantages of this technology, but it also allows us to carry out many future investigations for its better development such as:

The study of new modulation schemes based on those discussed here.

The implementation of the system in hardware in real way, seeing how they affect the obstruction of the line of direct vision and reflections. This way you can determine the accuracy of the simulator by comparing it with the actual results obtained.

Elaborate a more complex system using multiple transmitters. This is how we would build a Multiple-Input and Single-Output (MISO) system that would reduce the likelihood of blocking the direct line of sight.